

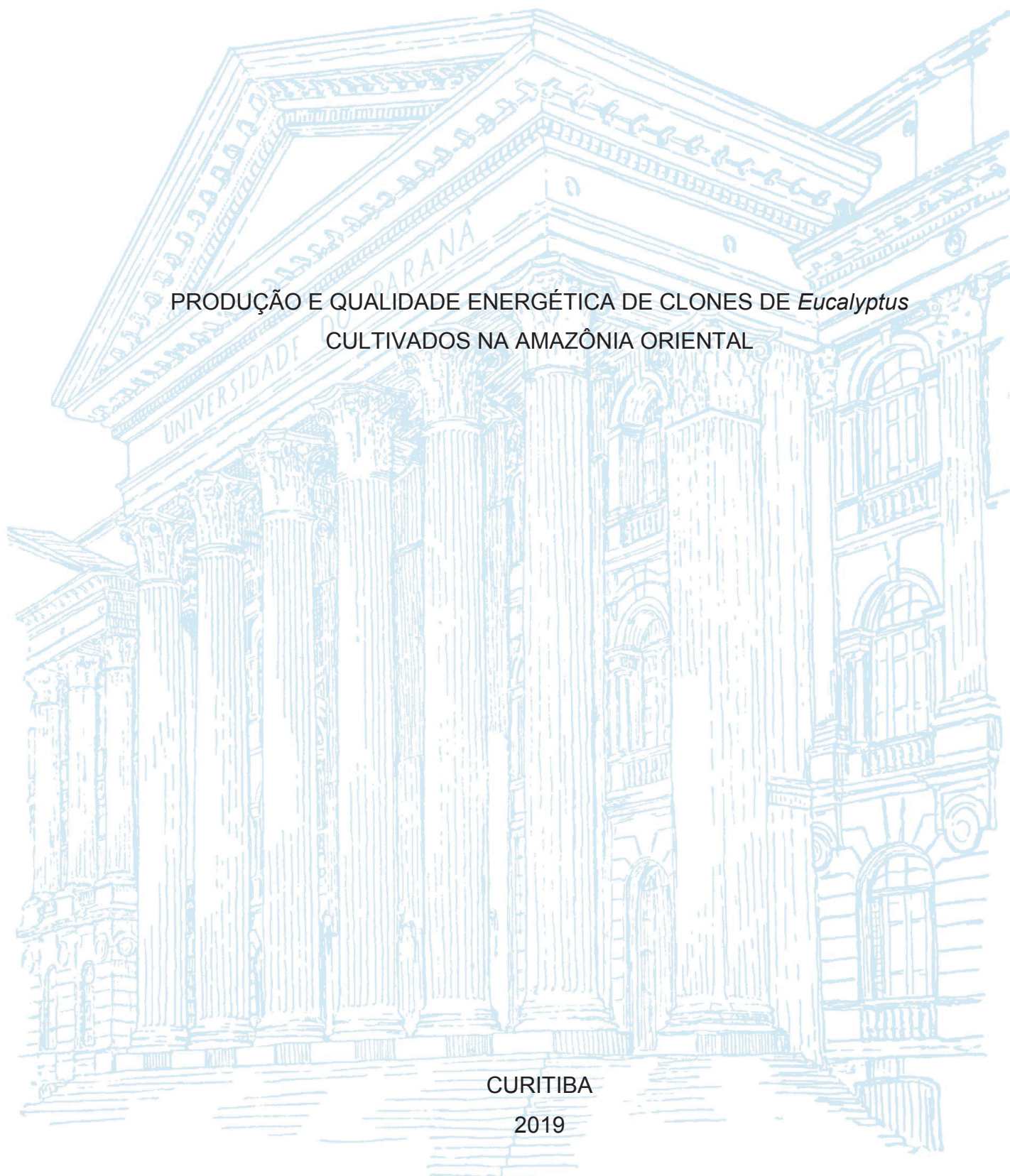
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RUDSON SILVA OLIVEIRA

PRODUÇÃO E QUALIDADE ENERGÉTICA DE CLONES DE *Eucalyptus*  
CULTIVADOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL

CURITIBA

2019



RUDSON SILVA OLIVEIRA

PRODUÇÃO E QUALIDADE ENERGÉTICA DE CLONES DE *Eucalyptus*  
CULTIVADOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima

Coorientadora: Prof(a). Dra. Selma Lopes Goulart

CURITIBA

2019

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Oliveira, Rudson Silva

Produção e qualidade energética de clones de *Eucalyptus* cultivados na  
Amazônia Oriental / Rudson Silva Oliveira. – Curitiba, 2019.  
90 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadores: Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima

Profa. Dra. Selma Lopes Goulart

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de  
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.  
Defesa: Curitiba, 27/02/2019.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Biomassa vegetal - Amazônia. 2. Biocombustíveis. 3. Eucalipto. 4.  
Árvores - Melhoramento genético. 5. Teses. I. Silva, Dimas Agostinho da. II.  
Nakajima, Nelson Yoshihiro. III. Goulart, Selma Lopes. IV. Universidade  
Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.548(81)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RUDSON SILVA OLIVEIRA** intitulada: **PRODUÇÃO E QUALIDADE ENERGÉTICA DE CLONES DE EUCALYPTUS CULTIVADOS NA AMAZÔNIA ORIENTAL**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Fevereiro de 2019.

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA  
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

GUILHERME DE CASTRO ANDRADE  
Avaliador Externo (EMBRAPA)

ALEXANDRE BEHLING  
Avaliador Interno (UFPR)

Aos meus pais, Teófilo e Ruth, e ao meu irmão Ruan pelo amor e proteção incondicional.

Aos meus avós maternos Maria e Edson, paternos Terezinha e Jorge (*in memoriam*) pelo afeto e valiosos ensinamentos.

**DEDIDO.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela razão da minha existência e por todas as bênçãos derramadas sobre a minha vida e de minha família.

À minha família que sempre esteve ao meu lado, sendo meu alicerce, me amparando nos momentos mais difíceis, pessoas maravilhosas no qual compartilho todas as minhas vitórias, derrotas, alegrias e tristezas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por toda a infraestrutura e formação técnico-científica, bem como a concessão da bolsa de mestrado, respectivamente.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus de Parauapebas, na pessoa da Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Selma Lopes, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Daiane Gomes e da coordenadora do curso de Engenharia Florestal Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Gládis Jucoski por toda infraestrutura de laboratório, materiais e equipamentos cedidos para execução da fase inicial do projeto de dissertação.

Ao Prof. Dr. Jonas Castro da Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus de Paragominas, pela articulação junto ao Grupo Concrem, em especial à Concrem Wood, pelo subsídio e fomento da pesquisa em suas áreas experimentais.

Ao meu amigo Cícero Dolácio por todo o apoio, auxílio e paciência durante todo o processo de obtenção dos dados, coleta de material e processamento das amostras. Além da parceria e da convivência pessoal ao longo desses 24 meses do mestrado.

Aos colegas do Laboratório de Energia de Biomassa (LEB) da UFPR, Fernando Ferraz, Clarice Andrade, Sandra Mayer, Vivian Takahashi e Vitória Roberta, pela parceria e toda ajuda prestada durante o processo de análises e obtenção dos resultados, além dos aconselhamentos e palavras de incentivos nos dias em que tudo conspirava à dar errado, vocês foram fundamentais para que eu mantivesse a calma e paciência para persistir no foco, em busca do meu objetivo.

Aos queridos alunos da iniciação científica da UFRA (Poliana Patrício, Chayanne Lopes, Juliene Oliveira e Beatriz Oliveira) e da UFPR (Martin Weiss, Eloisa Camilo, Bruna Santos e Otávio Zavelinski) que foram incansáveis e não mediram esforços para auxiliar durante todas as etapas da pesquisa, desde ajudar no



descarregamento das amostras até a última análise química realizada, acredite, vocês foram de suma importância para o sucesso desse estudo.

Por fim, ao meu comitê de orientação em especial ao Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva, pela confiança e apoio ao projeto de pesquisa proposto para esta dissertação, além de toda paciência e ensinamentos ofertados durante essa minha etapa de crescimento profissional e dos momentos de descontração e conselhos amigáveis.

À todos, meus sinceros agradecimentos.

Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é alguém que acredite que ele possa ser realizado. (Roberto Shinyashiki)



## RESUMO

O aproveitamento energético da madeira e dos coprodutos florestais tem se destacado nos últimos anos tanto em âmbito internacional como nacional, por se caracterizar como uma fonte de energia em potencial, limpa e renovável. Entretanto, na região amazônica ainda é incipiente a quantidade de área plantada para atender a demanda energética, principalmente, devido ao pouco conhecimento sobre quais materiais genéticos apresentam as melhores características para tal finalidade. Nesse sentido, esta pesquisa teve por objetivo avaliar a produção e a qualidade da biomassa de clones de *Eucalyptus* cultivados na Amazônia Oriental visando o seu emprego energético. Na realização desta pesquisa foram avaliados 10 clones de *Eucalyptus* aos 55 meses de idade, sendo amostradas seis árvores por material genético para determinar a biomassa aérea (fuste, galhos secos, galhos verdes, casca e folhas), e destas, foram escolhidas três árvores para as análises físicas, químicas e energéticas. Para facilitar a compreensão, esta dissertação foi dividida em dois tópicos principais: I – modelagem do estoque de biomassa e classificação preliminar dos clones de *Eucalyptus*, em que foram ajustados oito modelos alométricos para a estimativa de biomassa e em seguida os dados foram analisados em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com dez tratamentos (clones) e seis repetições (árvores) e as médias comparadas pelo teste de Scott-knott ( $p < 0.05$ ) para o agrupamento univariado dos clones; II – análise energética da biomassa dos clones selecionados, determinando as variáveis umidade, densidade básica, extrativos totais, lignina total, holocelulose, teor de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior, para isto, os dados foram analisados em DIC sob esquema fatorial (4x3) sendo o fator 1 (clones selecionados) e o fator 2 os três componentes avaliados (fuste, coproduto com folha e coproduto sem folha) com 3 repetições (árvores), em seguida as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0.05$ ). Os resultados evidenciam que o componente fuste é o que mais contribui na produção de massa seca total dos clones e a casca foi responsável por 41% da massa seca total dos coprodutos. Com base na classificação preliminar, foram selecionados quatro clones para as análises de qualidade energética, dos quais se destacaram o C-408, C-455 e o C-479 por apresentarem alta produção de biomassa e energia potencial por hectare, elevada densidade básica, estoque em carbono, lignina total, poder calorífico superior e menores teor de cinzas, sendo estes os indicados para o cultivo de povoamentos destinados a produção de bioenergia.

Palavras-chave: Bioenergia. Coprodutos florestais. Florestas energéticas. Manejo florestal. Região amazônica.

## ABSTRACT

The energy use of wood and forest co-products has been highlighted in recent years in both internationally and nationally, because characterized as a potential, clean and renewable source of energy. However, in the Amazon region the amount of area planted to attend energy demand is still incipient, mainly because of the lack of knowledge about which genetic material has the best characteristics for this purpose. In this sense, the objective of this research was to evaluate the production and biomass quality of *Eucalyptus* clones cultivated in the Eastern Amazon for their energy use. In this research, 10 *Eucalyptus* clones were evaluated at 55 months of age, six trees were sampled per genetic material to determine aboveground biomass (stem, dry branches, green branches, bark and leaves), and of these, three trees were chosen for the physical, chemical and energy analyzes. To facilitate comprehension, this dissertation was divided into two main topics: I – modeling of the biomass stock and preliminary classification of the *Eucalyptus* clones, where eight allometric models were adjusted for biomass estimation and then the data were analyzed in a completely randomized design with ten treatments (clones) and six repetitions (trees), and the averages were compared with Scott-Knott test ( $p < 0.05$ ) for the univariate cluster of clones; II – biomass energy analysis of the selected clones, determining the variables moisture content, basic density, total extractives, total lignin, holocellulose, content of volatile material, ashes, fixed carbon and high heating value, for this, the data were analyzed in a completely randomized design under a factorial scheme (4x3) being the factor 1 (selected clones) and factor 2 the three components evaluated (stem, co-products with leaves and co-products without leaves) with three repetitions (trees), then the averages were compared with Tukey test ( $p < 0.05$ ). The results demonstrate that the stem component is the most contributes in the production of total dry mass of the clones and the bark was responsible for 41% of the total co-products dry biomass. Based on the preliminary classification were selected four clones for the energetic quality analyzes, of which the C-408, C-455 and C-479 for having high production of biomass and potential energy per hectare, high basic density, carbon stock, total lignin, high heating value and lower ash content, being these one indicated for the cultivation of stands destined for the production of bioenergy.

Keywords: Bioenergy. Forestry co-products. Forest energetic. Forest management. Amazon region.

## RESUMEN

El aprovechamiento energético de la madera y de los co-productos forestales se ha destacado en los últimos años tanto a nivel internacional como nacional, por caracterizarse como una fuente de energía potencial, limpia y renovable. Sin embargo, en la región amazónica es insuficiente el área plantada para atender la demanda energética, principalmente, debido al poco conocimiento sobre los materiales genéticos que presentan las mejores características para tal fin. En este sentido, esta investigación tuvo por objetivo evaluar la producción y la calidad de la biomasa de clones de *Eucalyptus* cultivados en la Amazonía Oriental con miras a su utilización como fuente de energía. En la realización de esta investigación fueron evaluados 10 clones de *Eucalyptus* con 55 meses de edad, y muestreados seis árboles por material genético para determinar la biomasa aérea (fuste, ramas secas, ramas verdes, corteza y hojas), y de éstos, fueron escogidos tres árboles para los análisis físicos, químicos y energéticos. Para facilitar la comprensión, esta disertación fue dividida en dos tópicos principales: I - modelado del stock de biomasa y clasificación preliminar de los clones de *Eucalyptus*, donde se ajustaron ocho modelos alométricos para la estimación de biomasa y luego los datos fueron analizados en diseño completamente al azar (DCA) con diez tratamientos (clones) y seis repeticiones (árboles) y realizada la comparación de medias por medio de la prueba de Scott-knott ( $p < 0.05$ ) para la agrupación univariada de los clones; II – el análisis de la biomasa de los clones seleccionados, determinando las variables humedad, densidad básica, extractivos totales, lignina total, holocelulosa, contenido de materiales volátiles, cenizas, carbono fijo y poder calorífico superior, para lo cual, los datos fueron analizados en DCA bajo arreglo factorial ( $4 \times 3$ ) y el factor 1 (clones seleccionados) y el factor 2 los tres componentes evaluados (fuste, co-producto con hoja y co-producto sin hoja) con 3 repeticiones (árboles), luego las medias fueron comparadas por la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). Los resultados evidencian que el componente fuste fue el que más contribuye en la producción de masa seca total de los clones y la corteza fue responsable por el 41% de la masa seca total de los co-productos. Con base en la clasificación preliminar, se seleccionaron cuatro clones para los análisis de calidad energética, de los cuales se destacaron el C-408, C-455 y el C-479 por presentar alta producción de biomasa y energía potencial por hectárea, elevada densidad básica, stock de carbono, lignina total, poder calorífico superior y menor contenido de cenizas, siendo éstos los indicados para plantaciones destinadas a la producción de bioenergía.

Palabras clave: Bioenergía. Co-productos forestales. Bosques energéticos. Manejo forestal. Región amazónica.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA ÁREA PLANTADA COM EUCALIPTO NA AMAZÔNIA ORIENTAL .....	24
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DA ÁREA PLANTADA COM EUCALIPTO NOS ESTADOS DO TOCANTINS E MARANHÃO .....	25
FIGURA 3 – EVOLUÇÃO DA ÁREA PLANTADA COM EUCALIPTO NO ESTADO DO PARÁ.....	25
FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA NOS ESTADOS DE MINAS GERAIS, PARÁ E MARANHÃO (COMPLEXO CARAJÁS) ...	26
FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL, SITUADA NA FAZENDA RIO CONCREM, DOM ELIZEU, PARÁ.....	38
FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA POR CLASSE DE DIÂMETRO PARA OS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	39
FIGURA 7 – CORTE E CUBAGEM RIGOROSA DOS INDIVÍDUOS SELECIONADOS.....	41
FIGURA 8 – PESAGEM DA BIOMASSA VERDE DO COMPONENTE GALHO SECO DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	42
FIGURA 9 – PESAGEM DA BIOMASSA VERDE DOS COMPONENTE GALHO VERDE E FOLHA DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	43
FIGURA 10 – PESAGEM DA BIOMASSA VERDE DOS COMPONENTE CASCA E FUSTE DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	44
FIGURA 11 – AMOSTRAS COLETADAS DE CADA COMPONENTE PARA A REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES EM LABORATÓRIO. ....	45
FIGURA 12 – SECAGEM DAS AMOSTRAS EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO FORÇADA DE AR.....	46
FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE FORMULAÇÃO DAS AMOSTRAS DE COPRODUTOS COM FOLHA E SEM FOLHA .....	52
FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS .....	54
FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DAS AMOSTRAS.....	55
FIGURA 16 – ILUSTRAÇÃO DO ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DAS AMOSTRAS .....	56

FIGURA 17 – PARTICIPAÇÃO DOS COMPONENTES NA MASSA SECA TOTAL DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	60
FIGURA 18 – PARTICIPAÇÃO DOS COMPONENTES NA MASSA SECA TOTAL DOS COPRODUTOS DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	60
FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS TESTADOS EM FUNÇÃO DA MASSA SECA ESTIMADA. ....	63
FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS TESTADOS EM FUNÇÃO DO DAP.....	64
FIGURA 21 – DENSIDADE BÁSICA E ESTOQUE EM CARBONO ORGÂNICO NA MADEIRA DE CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	69
FIGURA 22 – PERCENTUAL DE CARBONO ORGÂNICO NA MADEIRA DE CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	70

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE DIFERENTES ESPÉCIES NATIVAS E EXÓTICAS .....	29
TABELA 2 – DENSIDADE ENERGÉTICA DE CINCO ESPÉCIES DE <i>Eucalyptus</i> AOS SEIS ANOS DE IDADE .....	30
TABELA 3 – QUÍMICA ELEMENTAR DE DIFERENTES ESPÉCIES DE <i>EUCALYPTUS</i> REPORTADOS NA LITERATURA .....	33
TABELA 4 – MATERIAIS GENÉTICOS AVALIADOS NO EXPERIMENTO .....	37
TABELA 5 – MODELOS ESTATÍSTICOS AJUSTADOS PARA OS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	47
TABELA 6 – MÉDIA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	58
TABELA 7 – MÉDIA DA BIOMASSA SECA DOS COMPONENTES DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	59
TABELA 8 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DEPENDENTES E INDEPENDENTES UTILIZADAS NOS AJUSTES DOS MODELOS ESTATÍSTICOS .....	61
TABELA 9 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS PARA ESTOQUE EM MASSA SECA TOTAL DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	61
TABELA 10 – RESUMO ESTATÍSTICO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA SECA TOTAL E ESTOQUE EM ENERGIA POTENCIAL .....	65
TABELA 11 – ESTOQUE DE MASSA SECA TOTAL E EM ENERGIA DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	66
TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA DENSIDADE BÁSICA, CARBONO ORGÂNICO E ESTOQUE EM CARBONO ORGÂNICO NA MADEIRA DOS CLONE DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	68
TABELA 13 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA EXTRATIVOS TOTAIS, LIGNINA TOTAL E HOLOCELULOSE DOS CLONE DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	71
TABELA 14 – RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA MACROMOLECULAR DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	72

TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DOS CLONE DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	74
TABELA 16 – RESULTADOS DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	75
TABELA 17 – RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DOS CLONES DE <i>EUCALYPTUS</i> .....	77



## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

PCS	- Poder calorífico superior
PCI	- Poder calorífico inferior
PCU	- Poder calorífico útil
C	- Carbono
H	- Hidrogênio
O	- Oxigênio
N	- Nitrogênio
S	- Enxofre
DAP	- Diâmetro altura do peito (1,30 cm)
HT	- Altura total
MST	- Massa seca total
B <sub>F</sub>	- Biomassa do fuste
B <sub>GS</sub>	- Biomassa de galhos secos
B <sub>GV</sub>	- Biomassa de galhos verdes
B <sub>FL</sub>	- Biomassa de folhas
B <sub>C</sub>	- Biomassa de casca
Bio <sub>CP</sub>	- Biomassa seca total de coprodutos
CP-CFL	- Coproduto com folha
CP-SFL	- Coproduto sem folha
Syx%	- Erro padrão da estimativa
$R^2_{aj}$	- Coeficiente de determinação ajustado
$\chi^2$	- Qui-quadrado
Ln	- Logaritmo natural
<i>e</i>	- Erro amostral
ANOVA	- Análise de variância
DIC	- Delineamento inteiramente casualizado
EXT	- Extrativos totais
LT	- Lignina total
HOLO	- Holocelulose
MV	- Teor de materiais voláteis
CF	- Teor de carbono fixo
CZ	- Teor de cinzas

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	21
1.2 OBJETIVOS .....	22
1.2.1 Objetivo geral .....	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>23</b>
2.1 ESTADO DA ARTE DO CULTIVO DE EUCALIPTO NA AMAZÔNIA ORIENTAL...	23
2.2 BIOMASSA FLORESTAL PARA ENERGIA .....	27
2.3 PROPRIEDADES DA BIOMASSA PARA A COMBUSTÃO COMPLETA.....	28
2.3.1 Poder calorífico .....	28
2.3.2 Densidade básica .....	30
2.3.3 Teor de umidade .....	31
2.3.4 Composição química da madeira .....	31
2.3.4.1 Composição química elementar da madeira .....	32
2.3.4.2 Composição química macromolecular da madeira .....	33
2.3.4.3 Composição química imediata da madeira .....	35
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	37
3.2 BIOMASSA FLORESTAL.....	39
3.3 TÓPICO I: MODELAGEM DO ESTOQUE DE BIOMASSA E CLASSIFICAÇÃO PRELIMINAR DOS CLONES .....	46
3.3.1 Processamento dos dados .....	46
3.3.2 Ajuste dos modelos .....	47
3.3.3 Validação dos modelos .....	49
3.3.4 Classificação preliminar dos clones .....	50
3.3.5 Análise estatística do Tópico I .....	50
3.4 TÓPICO II: ANÁLISE DA QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DOS CLONES SELECIONADOS .....	51
3.4.1 Preparo das amostras .....	51
3.4.2 Determinação da densidade básica da madeira .....	53
3.4.3 Análise química macromolecular.....	53

3.4.4 Análises energéticas .....	53
3.4.5 Análise estatística do Tópico II .....	57
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
4.1 TÓPICO I: MODELAGEM DO ESTOQUE DE BIOMASSA E CLASSIFICAÇÃO PRELIMINAR DOS CLONES .....	58
4.1.1 Participação dos componentes no estoque de massa seca total e na biomassa de coprodutos total dos clones de <i>Eucalyptus</i> .....	58
4.1.2 Ajustes dos modelos estatísticos para estimativa do estoque em massa seca total .....	61
4.1.3 Classificação preliminar dos Clones.....	65
4.1.4 Considerações do Tópico I.....	67
4.2 TÓPICO II: ANÁLISE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DOS CLONES SELECIONADOS .....	68
4.2.1 Análise físico-química.....	68
4.2.2 Análise energética da biomassa.....	74
4.2.3 Considerações do Tópico II.....	79
<b>5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no cenário mundial como o país com extensas áreas de plantios florestais, pautada na sustentabilidade e avanços em inovações silviculturais, com desenvolvimento de novos materiais genéticos altamente produtivos e a busca pela otimização de todas as fases da cadeia produtiva, ou seja, desde o melhoramento genético e produção de mudas até a colheita e o beneficiamento mais eficiente e racional da biomassa florestal.

O aproveitamento energético da madeira e dos coprodutos florestais tem se destacado nos últimos anos tanto em âmbito nacional quanto internacional, por se caracterizar como uma fonte de energia em potencial limpa e renovável além de conseguir atender as demandas do setor industrial, agrícola e doméstico.

No Brasil, o setor tem grande importância em virtude da cobertura florestal nativa representar mais de 60% do território nacional e ainda apresentar crescentes aumentos nas áreas de florestas plantadas, que no ano de 2016, contabilizou 5,7 milhões de hectares de área cultivada com *Eucalyptus*, esboçando um crescimento de 2,4% por ano, deste segmento nos últimos cinco anos (IBÁ, 2017).

O reflorestamento comercial na Amazônia brasileira é uma atividade que vem se expandindo nas últimas décadas, seja por motivos de reposição florestal, em cumprimento às novas leis ambientais, ou pela falta de matéria prima para o abastecimento das indústrias do setor, como os painéis de madeira, celulose e papel e carvão vegetal.

Neste sentido, o seguimento florestal no Estado do Pará, mais especificamente nas mesorregiões Nordeste e Sudeste, vem despontando na silvicultura de florestas plantadas. De acordo com levantamento realizado na base de dados da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SEMAS/PA), no período de 2008 a 2012, foram contabilizados cerca de 312 licenças de projetos de reflorestamentos, em que 67,31% e 24,68% pertenciam às mesorregiões supramencionadas, respectivamente (ALMEIDA; COUTINHO; SANTANA, 2011; TENÓRIO et al., 2015).

O destaque da Amazônia oriental, notadamente nas mesorregiões Nordeste e Sudeste do Estado do Pará e Oeste do Estado do Maranhão para os plantios florestais com base na eucaliptocultura ocorreu, principalmente, devido ao crescimento da demanda por carvão vegetal visando abastecer os fornos de

beneficiamento de minério de ferro instalados no Polo siderúrgico de Carajás, situados nos municípios de Marabá – PA e Açailândia – MA.

Paralelamente à atividade de carvoejamento, outros seguimentos do setor florestal para uso da madeira oriunda de reflorestamento ganharam força, como é o caso dos painéis de madeira que eram produzidos, principalmente, a partir do Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (HUBER ex DUCKE) Barnebi), e da indústria de celulose e papel, ambos obtidos a partir da madeira de espécies do gênero *Eucalyptus*.

Vale ressaltar também que o Estado do Pará vem se destacando na produção de grãos (milho e soja) colocando em evidencia a região Norte como a nova fronteira agroflorestal do país e, conseqüentemente, criando um novo nicho para atuação da atividade florestal, que se trata do consumo de biomassa florestal para uso energético com objetivo de gerar calor para auxiliar na secagem dos grãos antes do seu transporte até os portos de escoamento da produção.

Portanto, os atrativos econômicos em conjunto com as exigências das novas legislações ambientais vigentes, proporcionou um aumento dos plantios com eucalipto em áreas já alteradas do Estado, aumentando a possibilidade na geração de emprego e renda nas regiões implantadas.

O Estado do Pará possui grande potencialidade para a expansão do setor florestal à base da eucaliptocultura, não só pelas condições edafoclimáticas favoráveis, como também pela necessidade em suprir o *déficit*, frente as demandas encontradas para o mercado de painéis de madeira, celulose e papel e, principalmente, biomassa para geração de energia ou para a produção de carvão vegetal (ALMEIDA; COUTINHO; SANTANA, 2011).

Contudo, as empresas e a comunidade científica da região amazônica dispõem de poucos estudos a respeito das espécies do gênero *Eucalyptus* para emprego energético na região norte, e as informações existentes dificilmente são divulgadas (MATOS et al., 2012). Neste sentido, é essencial o desenvolvimento de pesquisas com intuito de identificar os melhores materiais genéticos com potencial para a transformação da sua biomassa lignocelulósica em calor, a partir da combustão direta, ou em carvão vegetal através do processo de carbonização.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A região amazônica destaca-se no setor florestal pela grande biodiversidade existente e a potencialidade na oferta de madeira, além de ser responsável pelo abastecimento do país com madeira processada, atualmente só permitido por lei, através do manejo sustentável da floresta nativa.

Entretanto, a região norte do Brasil, mais especificamente o Estado do Pará, vem se destacando como a nova fronteira agroflorestal devido aos investimentos na produção de grãos e no cultivo de essências florestais, principalmente, do gênero *Eucalyptus*, sendo este último, responsável por abastecer parte das indústrias de base florestal instaladas na região, além de proporcionar a diminuição da pressão sobre o corte da floresta nativa para atender a mesma finalidade.

As pesquisas relacionadas a silvicultura, manejo, propriedades da madeira e seleção de materiais genéticos de *Eucalyptus* encontram-se bastante avançadas nas regiões sul e sudeste do Brasil, devido a sua intensa utilização ao longo dos anos pelas indústrias de celulose e papel, bem como para a geração de calor e produção de carvão vegetal empregados no beneficiamento do minério de ferro.

Em contrapartida, quando se trata da região Norte esse cenário muda, uma vez que as características edafoclimáticas são distintas das regiões sul e sudeste, logo, necessita-se de pesquisas visando testar o comportamento silvicultural do *Eucalyptus* e a qualidade do material obtido após atingir a idade técnica de corte buscando correlaciona-las com a destinação final de sua biomassa.

Quando o assunto é empregar a biomassa de *Eucalyptus* para energia na região amazônica, seja para produção de carvão ou geração direta de calor (combustão), pouco se conhece sobre quais materiais genéticos que apresentam as melhores características para tal finalidade. Neste sentido, faz necessário a execução dessa pesquisa para a indicação dos melhores clones de *Eucalyptus*, que estão instalados em um plantio experimental na mesorregião do sudeste paraense, que apresentam potencial para bioenergia.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a produção e a qualidade da biomassa de clones de *Eucalyptus* visando o emprego energético na Amazônia Oriental.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Analisar a contribuição de cada componente da árvore no estoque de biomassa total e no de coprodutos totais;

Ajustar modelos estatísticos para a estimativa do estoque de biomassa total e classificar preliminarmente os clones potenciais para uso bioenergético em função do estoque de energia por hectare;

Avaliar a qualidade energética da biomassa dos clones de *Eucalyptus* selecionados;

Analisar a influência do componente folhas na qualidade energética dos coprodutos.



## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ESTADO DA ARTE DO CULTIVO DE EUCALIPTO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Nos Estados da Amazônia a extração madeireira de florestas nativas tornou-se a principal atividade econômica após a abertura das rodovias que os interligavam e foi impulsionada pelo esgotamento das reservas florestais da Mata Atlântica. Nesse contexto muitos municípios surgiram advindo do fortalecimento dessa atividade com grandes custos sociais e ambientais.

A partir da década de oitenta, pesquisadores de todo o mundo somaram esforços para chamar atenção para a Amazônia, sendo o ápice desse movimento marcado pela Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, sediada no Rio de Janeiro em 1992 (Rio 92) e o Protocolo de Kyoto em 1997 que buscaram consolidar o conceito de desenvolvimento sustentável e promover políticas de maior proteção ao meio ambiente.

As atividades econômicas desenvolvidas na Amazônia contribuíram para o aumento do desmatamento na região a partir do regime militar (1964 – 1985) quando programas específicos de desenvolvimento e ocupação estimularam o crescimento populacional e econômico da região (MELLO; ARTAXO, 2017).

Os plantios florestais com espécies de ciclo curto foi uma das atividades ligada ao setor primário escolhida com objetivo de recompor as áreas alteradas e, concomitantemente, abastecer ao setor florestal, entretanto, as pesquisas silviculturais na Amazônia ficaram durante muitos anos em segundo plano.

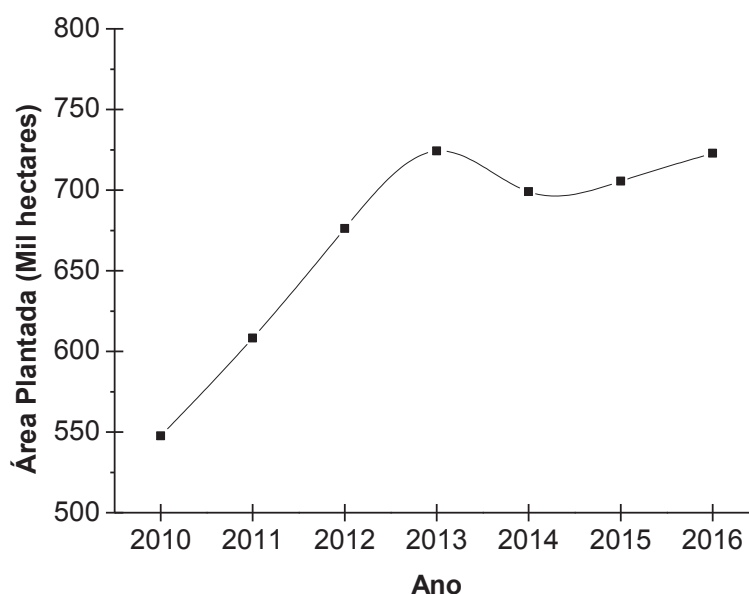
Apesar dos primeiros plantios florestais na região datarem de meados de 1967, fomentados pelo Projeto Jari com a implantação de *Gmelina* (*Gmelina arborea* Roxb.) e *Pinnus* sp., que alguns anos depois viriam a ser substituídos por espécies do gênero *Eucalyptus*, não houve muitos avanços em relação ao manejo, principalmente do eucalipto, como desenvolvimento de materiais genéticos mais adaptados à realidade amazônica e de elevada produtividade (HOMMA, 2011).

Na Amazônia Oriental, formada pelo Estados do Pará, Maranhão, Amapá, Tocantins e Mato Grosso, o cultivo da cultura do eucalipto tem aumentado em toda sua extensão. Segundo dados do IBÁ (2017), houve um incremento médio anual em área plantada de 4,4% no período entre 2010 a 2016, o que corresponde a um

acrécimo de aproximadamente 29,2 mil hectares de novas áreas plantadas a cada ano.

Na Figura 1 é possível observar o histórico de área plantada com *Eucalyptus* na Amazônia Oriental, onde ocorreu um crescimento ascendente de 2010 a 2013 com o aumento em 32% de área total chegando a apresentar aproximadamente 724 mil ha cultivados com esta essência florestal.

FIGURA 1 – EVOLUÇÃO DA ÁREA PLANTADA COM EUCALIPTO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

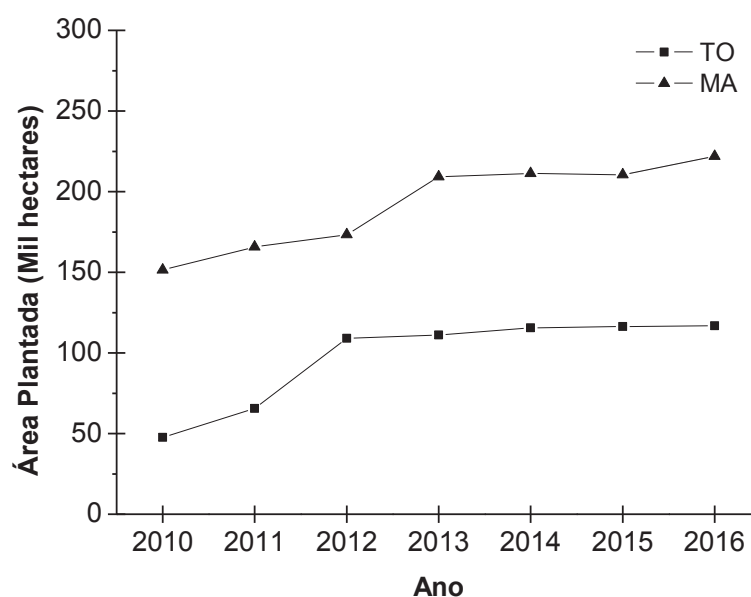


FONTE: Adaptado de Ibá (2017).

Destaca-se que todo este desenvolvimento foi impulsionado pela instalação da nova fábrica da Suzano Papel e Celulose em 2009 na cidade de Imperatriz no Maranhão, com início de suas operações ao final de 2013. Para atender a demanda da indústria, se iniciou o processo de expansão da eucaliptocultura, principalmente, nos Estados do Maranhão (MA) e Tocantins (TO) (Figura 2).

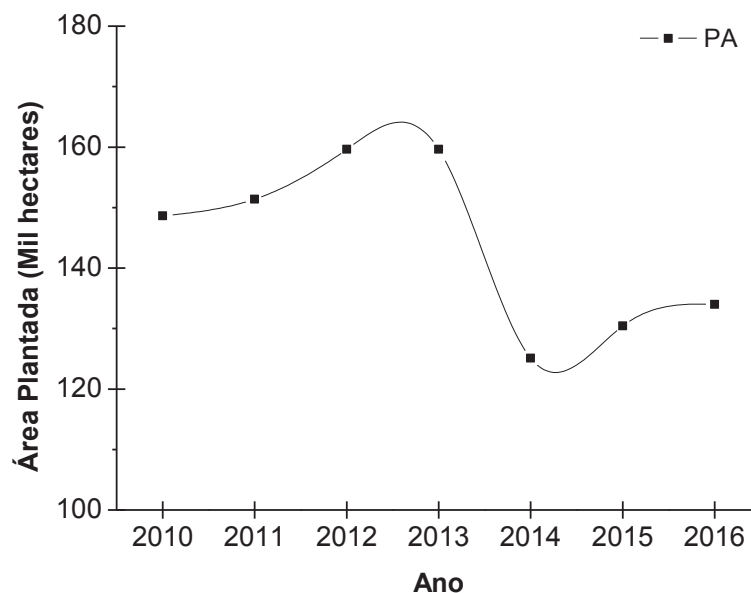
No ano de 2014 houve uma queda de 3,6% em relação a 2013 (Figura 1), em que deixaram de ser plantados em torno de 25 mil ha de florestas de *Eucalyptus*, sendo este comportamento vinculado a redução de plantios efetivos no Estado do Pará no mesmo período (Figura 3) influenciados possivelmente pela substituição dessas áreas por culturas de ciclo anual como a soja e o milho.

FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DA ÁREA PLANTADA COM EUCALIPTO NOS ESTADOS DO TOCANTINS E MARANHÃO



FONTE: Adaptado de Ibá (2017).

FIGURA 3 – EVOLUÇÃO DA ÁREA PLANTADA COM EUCALIPTO NO ESTADO DO PARÁ



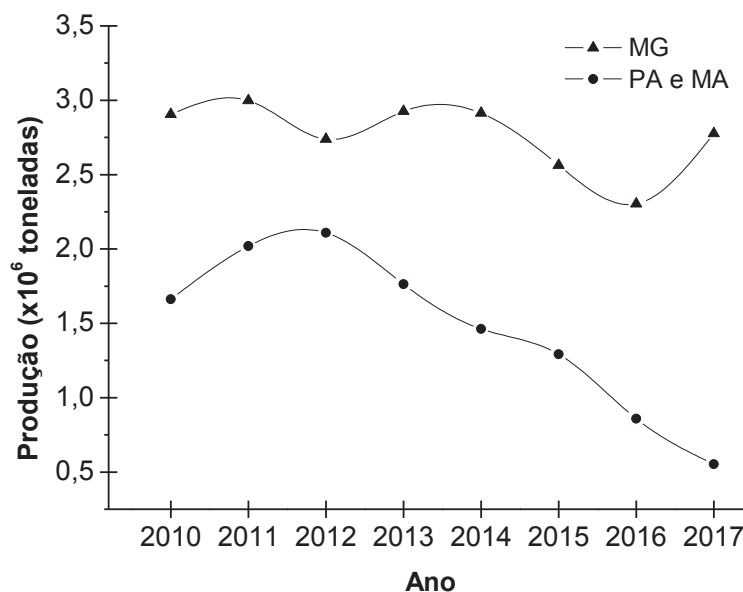
FONTE: Adaptado de Ibá (2017).

No Estado do Pará, embora a produção florestal do gênero *Eucalyptus* atender principalmente as indústrias do setor de painéis e celulose, apresenta grande potencial para aumentar exponencialmente a demanda por madeira de reflorestamento de eucalipto, principalmente, para a produção de carvão vegetal de uso siderúrgico.

Segundo Homma (2011), as guseiras, siderúrgicas produtoras de gusa, implantadas no Complexo de Carajás, situado nas mesorregiões Sudeste do Pará e Sul do Maranhão, apenas para a atividade de redução do minério de ferro, aponta uma demanda potencial de aproximadamente 120 mil ha ano<sup>-1</sup> de florestas de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal.

Entretanto, de acordo com os dados do Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais – Sindifer (2017), a produção de ferro-gusa apresentou forte desaceleração a partir de 2012 em todo o país ( $\pm 37\%$ ), sendo o Complexo Carajás a região que mais sofreu com os reflexos da retração do setor (Figura 4), impulsionado pela crise internacional de 2008 e a impossibilidade de atender à demanda por carvão vegetal de florestas plantadas, acarretando no fechamento de várias guseiras (HOMMA, 2015).

FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA NOS ESTADOS DE MINAS GERAIS, PARÁ E MARANHÃO (COMPLEXO CARAJÁS)



FONTE: Adaptado de Sindifer (2017).

É notório que o Complexo Carajás, ao longo da série histórica apresentou um comportamento semelhante ao Estado de Minas Gerais, maior beneficiador de minério de ferro do Brasil, em relação a produção de ferro-gusa. A partir da retomada do setor siderúrgico no último trimestre de 2017, espera-se que as indústrias da região Norte voltem a alavancar sua produção nos próximos anos, criando demanda para a produção de carvão vegetal oriundo de plantios de *Eucalyptus*.

Vale destacar que com o avanço da agricultura das regiões Sudeste e Centro Oeste para o Norte do país, criou-se um novo nicho de mercado potencial para madeira reflorestada, trata-se do emprego da biomassa florestal de eucalipto (lenha ou cavaco) para alimentar as caldeiras/fornalhas que integram os silos de secagem e armazenamento dos grãos colhidos durante as safras.

Nesse sentido, observa-se que o cenário da eucaliptocultura nos Estados da Amazônia Oriental apresenta fatores potenciais para que haja o aumento de áreas plantadas com espécies do gênero *Eucalyptus* nos próximos anos. Entretanto, é imprescindível a realização de pesquisas que vislumbrem testar novos materiais genéticos para atender as demandas do setor.

## 2.2 BIOMASSA FLORESTAL PARA ENERGIA

A biomassa florestal é todo material orgânico e de origem vegetal, proveniente dos diferentes componentes das árvores (folhas, galhos, casca, fuste e raízes), além de ser considerado uma fonte alternativa e renovável de energia. Para Nogueira & Lora (2003), a biomassa é a matéria vegetal oriunda da fotossíntese, que contém energia química procedente da transformação energética da radiação solar.

A obtenção dessa biomassa florestal para utilização energética pode ocorrer a partir da colheita da madeira ou do aproveitamento dos coprodutos gerados na própria colheita ou nas indústrias a partir do processamento da madeira.

Entende-se por coprodutos florestais todo o material orgânico que não é considerado como a matéria-prima principal que alimenta a indústria, mas passa por um processamento para sua utilização como fonte primária. Neste sentido, os demais componentes das árvores (galhos, folhas e cascas) são considerados como os coprodutos florestais, que apesar de não serem utilizados no processo industrial podem ser a matéria-prima fundamental para alimentar as caldeiras de força que suprem a demanda energética das fábricas.

A biomassa florestal se destaca como fonte de energia limpa e renovável, sendo indispensável para o suprimento energético de grande parte dos processos industriais devido ao baixo custo comparado às fontes fósseis. E por essas características intensificou-se o conceito de florestas energéticas, ou seja, plantios florestais destinados para a utilização da biomassa como fonte de energia.

A biomassa lignocelulósica pode ser convertida em inúmeros combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos por meio de rotas termoquímicas e bioquímicas, mecânicas ou a conciliação destas (BRIDGWATER, 2006). Os dois processos mais empregados para o uso da energia da madeira no Brasil são: a combustão direta, para a geração de calor, e a pirólise lenta, para a produção de carvão vegetal.

A combustão completa é considerada a forma mais simples de uso energético da madeira e consiste na oxidação dos principais elementos químicos combustíveis (Carbono e Hidrogênio). É uma reação exotérmica, ou seja, ocorre liberação de energia térmica calorífica, dessa forma, o calor liberado pode ser destinado à cocção de alimentos, aquecimento, secagem de grãos ou para produção de vapor em caldeiras e, conseqüentemente, geração de bioeletricidade. No Brasil, em 2014, foram consumidos 79.768.000 toneladas de lenha, sendo que 34,2% foram destinados à produção de carvão vegetal e geração de energia elétrica (BRASIL, 2015).

A carbonização ou pirólise da madeira, conforme supracitado, é outro processo termoquímico de conversão energética da biomassa, que consiste na degradação térmica dos componentes químicos macromoleculares (hemiceluloses, celulose e lignina) na presença controlada ou ausência de oxigênio, em temperaturas acima de 300°C, tendo como objetivo a obtenção de um combustível sólido com maior concentração de carbono (Carvão vegetal) (PROTÁSIO et al., 2014).

Portanto, tendo em vista a relevância do uso da biomassa florestal para conversão energética, justifica a necessidade de estudos capazes de disponibilizar, para o setor florestal brasileiro, materiais genéticos que associem as características de crescimento com as qualidades da madeira, que visem à otimização da produtividade energética por hectare.

## 2.3 PROPRIEDADES DA BIOMASSA PARA A COMBUSTÃO COMPLETA

### 2.3.1 Poder calorífico

No uso energético da biomassa lignocelulósica para a geração direta de energia térmica, a quantidade de energia calorífica liberada pelo material é a informação chave para ajustar a quantidade a ser inserida no processo com intuito de atender uma determinada demanda energética.

Para Brand (2010), o poder calorífico é uma das propriedades mais importante para avaliar a viabilidade de determinados combustíveis para a geração de energia. Contudo, é importante mencionar que para a biomassa florestal é de fundamental importância a análise e conhecimento de suas propriedades químicas e físicas, bem como os processos empregados para sua transformação.

A propriedade energética do combustível (biomassa) é determinada a partir do poder calorífico superior (PCS), uma vez que este expressa a quantidade de energia térmica liberada durante o processo de combustão completa por unidade de massa do material (BRAND, 2010). Sendo que na determinação deste, não se considera a reação endotérmica para a evaporação da água formada a partir da junção das moléculas de oxigênio (O<sub>2</sub>) e hidrogênio elementar (H) presente na constituição química estrutural da biomassa analisada.

Outra maneira de expressar o valor energético liberado pelo material é o poder calorífico inferior (PCI), que segue o mesmo princípio do PCS. Entretanto, desconta-se a quantidade de energia gasta para a evaporação da água formada no processo de combustão completa (PROTÁSIO et al., 2014).

Na Tabela 1 estão relacionados os resultados encontrados na literatura para o PCS de diferentes espécies nativas e exóticas.

TABELA 1 – VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA PARA O PODER CALORÍFICO SUPERIOR DE DIFERENTES ESPÉCIES NATIVAS E EXÓTICAS

ESPÉCIE	MATERIAL	PCS (kcal kg <sup>-1</sup> )	AUTOR
<i>Eucalyptus spp.</i>	Fuste	4623	(NEVES et al., 2011)
<i>Eucalyptus spp.</i>	Maravalhas	4572	(PROTÁSIO et al., 2011)
<i>Pinus spp.</i>	Maravalhas	4864	
<i>Pinus Taeda</i> (10 anos)	Fuste	4979	(FURTADO et al., 2012)
<i>Pinus Taeda</i> (12 anos)	Fuste	5039	
<i>Pinus Taeda</i> (14 anos)	Fuste	4998	
<i>Pinus Taeda</i> (24 anos)	Fuste	5135	
<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	Fuste	4570	(PROTÁSIO et al., 2013)
<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden	Fuste	4573	
<i>Miconia cinnamomifolia</i> (De Candolle) Naudin ( <b>Jacatirão-açu</b> )	Fuste	4178	(BRAND et al., 2013)
<i>Hieronyma alchorneoides</i> ( <b>Licurana</b> )	Fuste	4315	(CARVALHO et al., 2014)
<i>Poincianella pyramidalis</i> ( <b>Catingueira</b> )	Fuste	4413	(MEDEIROS NETO; OLIVEIRA; PAES, 2014)
<i>Handroanthus impetiginosus</i> ( <b>Pau d'arco</b> )	Fuste	4806	
<i>Mimosa scabrella</i> Benth. ( <b>Bracatinga</b> )	Fuste	4400	(FRIEDERICHES et al., 2015)
<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden	Fuste	4468	(ELOY et al., 2016)
<i>Eucalyptus robusta</i>	Fuste	4669	(JESUS et al., 2017)

FONTE: O autor (2019).



### 2.3.2 Densidade básica

A densidade básica é considerada o principal parâmetro físico, usado para expressar a qualidade nos variados processos industriais, devido estar relacionada com alguns aspectos tecnológicos e econômicos importantes, além de apresentar uma íntima relação com outras propriedades e por ser de fácil determinação (MATTOS et al., 2011).

Os materiais com densidades elevadas indicam apresentar uma maior quantidade de massa por unidade de volume, portanto, maior será o aproveitamento do combustível para a geração direta de calor ou na produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012).

Para a geração de energia térmica a densidade básica é considerada um índice importante para avaliação da qualidade. Quanto maior o valor desta propriedade menor o custo com transporte e maior será a densidade energética, ou seja, maior a quantidade de energia possível de ser liberada após a combustão completa por unidade de volume do combustível lignocelulósico (ASSIS et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2015).

Na Tabela 2 encontram-se resultados da densidade energética de cinco materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* aos seis anos de idade.

TABELA 2 – DENSIDADE ENERGÉTICA DE CINCO ESPÉCIES DE *Eucalyptus* AOS SEIS ANOS DE IDADE

ESPÉCIE	Poder calorífico Superior (kcal kg <sup>-1</sup> )	Densidade Básica (kg m <sup>-3</sup> )	Densidade Energética (Mcal m <sup>-3</sup> )
<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden x <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	4538	374	1697
<i>Eucalyptus propinqua</i> H. Deane & Maiden	4623	406	1876
<i>Eucalyptus robusta</i> Sm.	4669	418	1951
<i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell	4634	466	2159
<i>Eucalyptus botryoides</i> Sm.	4620	391	1806

FONTE: Adaptado de Jesus et al. (2017).

O elevado poder calorífico do combustível aliado a alta densidade resulta em maximização da densidade energética (DE), sendo esta última, a quantidade de energia contida em determinado volume de material.

Esta é uma característica importante a ser considerada ao se realizar estudos de viabilidade técnica e econômica na aquisição e transporte de combustíveis até as plantas industriais, uma vez que quanto maior for o seu valor, maior é a quantidade de energia armazenada que será transportada por unidade de volume ( $\text{m}^3$ ).

### 2.3.3 Teor de umidade

A umidade é outra propriedade importante a se considerar, não apenas para diminuir os custos com transporte, mas também para uso da madeira como combustível. Para Furtado et al. (2012), a umidade apresenta uma correlação negativa com o poder calorífico, portanto, quanto maior o teor de água na biomassa menor será seu valor calórico.

A variação dos níveis de umidade da biomassa pode causar problemas operacionais nos equipamentos destinados à conversão energética como a diminuição da estabilidade da combustão e um fornecimento de calor insuficiente sob elevada demanda de energia térmica. Contudo, esses danos ao processo podem ser mitigados ajustando o regime de operação do aparelho de queima a partir do conhecimento das propriedades do combustível, incluindo o seu teor de umidade (STRIÜGAS et al., 2017).

Price-Allison et al. (2019) ao avaliarem a performance da lenha com diferentes teores de umidade em caldeiras, verificaram que o elevado conteúdo de umidade na biomassa contribuiu para um desempenho térmico limitado, ou seja, uma combustão lenta e incompleta seguido por aumento nas emissões de materiais particulados.

### 2.3.4 Composição química da madeira

A viabilidade de uso da madeira como fonte de energia pode ser determinada conhecendo-se a sua composição química, sendo esta dividida em três formas, a saber: composição química elementar, macromolecular e composição química imediata que determina os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas.

#### 2.3.4.1 Composição química elementar da madeira

O uso da madeira como combustível requer uma caracterização elementar, que a partir de ensaios são determinados os principais elementos constituintes da biomassa lignocelulósica, ou seja, carbono (C), hidrogênio (H), Oxigênio (O), Nitrogênio (N) e Enxofre (S), que formam as biomoléculas que compõe a madeira.

A determinação dos teores de cada elemento auxilia na avaliação do comportamento energético ao correlacionar a energia térmica (PCS) liberada pelo processo de combustão com o carbono e hidrogênio, pois esses são os principais elementos químicos combustíveis. Coligado a isso, elevadas proporções de oxigênio, nitrogênio e cinzas resultam em uma diminuição do valor calórico (BRAND, 2010; NOGUEIRA; LORA, 2003).

O teor de carbono é muito importante na queima direta da madeira sendo totalmente consumido. Não obstante, o hidrogênio, mesmo estando em pequenas quantidades, apresenta importância na geração de energia térmica porque durante o processo de conversão energética o mesmo libera mais energia do que o carbono (CARNEIRO et al., 2014).

Protásio et al. (2011) ao estudarem a correlação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal, observaram que ela foi positiva entre o PCS e os teores de C e H. Portanto, há uma tendência de maiores valores de PCS estarem associados a maiores valores percentuais de C e H presentes na biomassa lignocelulósica.

Segundo os mesmos autores, não há correlação positiva entre o PCS e os teores de O<sub>2</sub>, logo, compostos com elevados percentuais desse elemento implicam em menor energia armazenada. As cinzas por se tratarem de componentes minerais inorgânicos presentes no material, não participam do processo de combustão completa, contribuindo para a diminuição do valor energético a ser liberado pelo combustível, consequentemente, evidenciando a correlação negativa com o PCS (BRAND, 2010).

O enxofre, juntamente com as cinzas, é considerado uma impureza, de ocorrência natural, presente no combustível, e a sua combustão gera dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), que quando combinado com a água pode gerar ácido sulfúrico diluído (QUIRINO et al., 2005).

Elevados teores de nitrogênio acarretam na formação de óxido nítrico (NO<sub>x</sub>) durante o processo de combustão, que pode resultar na corrosão dos equipamentos utilizados na obtenção da energia da biomassa, além de impactos negativo ao meio ambiente e na saúde humana (CARNEIRO et al., 2014).

Tomando como exemplo a madeira do gênero *Eucalyptus*, verifica-se que sua composição química elementar sofre pouca variação com a idade, espécie, espaçamento, sítio e práticas silviculturais, sendo que os valores médios reportados na literatura podem ser observados na Tabela 3.

TABELA 3 – QUÍMICA ELEMENTAR DE DIFERENTES ESPÉCIES DE *EUCALYPTUS* REPORTADOS NA LITERATURA

ESPÉCIE	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake	48,54	6,28	44,93	0,09	0,16
<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	48,27	6,29	45,09	0,09	0,24
<i>Eucalyptus robusta</i> Sm.	48,20	6,36	45,04	0,08	0,21

FONTE: Protásio et al. (2011, 2013).

LEGENDA: C = carbono; H = hidrogênio; O = oxigênio; N = nitrogênio e S = enxofre.

#### 2.3.4.2 Composição química macromolecular da madeira

A quantificação das macromoléculas (celulose, hemiceluloses e lignina) e dos teores de extrativos presentes na madeira são de fundamental importância para a avaliação e classificação de materiais para a geração direta de energia.

A composição química macromolecular e elementar da biomassa influenciam diretamente o PCS da madeira. A lignina e os extrativos apresentam baixo grau de oxidação e alto calor de combustão em comparação com a celulose e as hemiceluloses, justificando assim a sua influência no valor calórico da biomassa vegetal (PROTÁSIO et al., 2012, 2011).

As hemiceluloses são degradadas entre as temperaturas de 225 a 325°C, a celulose entre 305 e 375°C e as lignina de 250 a 700°C. Portanto, teores mais elevados de holocelulose (celulose + hemicelulose) não são ideais quando a madeira é destinada para a produção de bioenergia por meio da combustão direta em caldeiras, gaseificadores ou termoelétricas, ou para a produção de carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012; SHAFIZADEH, 1985).

Em estudos realizados por Telmo & Lousada (2011), com auxílio de regressão linear múltipla, verificou-se que 56,4% do PCS foi explicado pelo teor de lignina,

enquanto que os extrativos (polares e não polares), explicaram 43,6%. Portanto, a lignina e os extrativos merecem destaque por apresentarem relação direta com a energia térmica liberada pelo material lignocelulósico.

Estudos apontam que o PCS para as moléculas de celulose e hemiceluloses é de aproximadamente  $4183 \text{ kcal kg}^{-1}$ , enquanto que a lignina apresenta valor calórico entre  $5305 - 6811 \text{ kcal kg}^{-1}$  (média de  $6058 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), isso pode ser explicado pelo maior teor de carbono e as diferenças na composição química dessa macromolécula (DEMIRBAS, 2001, 2017).

A lignina é uma macromolécula complexa, tridimensional, amorfa, constituída de estruturas de fenilpropano metoxiladas, além de apresentar elevada massa molecular. Na biomassa, ela preenche os espaços vazios entre as moléculas de celulose e hemiceluloses, conferindo uma matriz lignocelulósica rígida (LIU; JIANG; YU, 2015; ZAKZESKI et al., 2010).

Segundo os mesmos autores, o polímero de lignina consiste principalmente de três monômeros primários, a saber, álcool p-cumarílico (unidade cumaril), álcool coniferílico (unidade guaiacil) e álcool sinapílico (unidade siringil), estes por sua vez apresentam cerca de 40% da energia possível contida na biomassa, devido ao seu elevado teor de carbono.

A quantidade dos precursores da lignina, álcool p-cumarílico, coniferílico e sinalíptico, variam entre os grupos das coníferas e folhosas. Para as madeiras de coníferas, o álcool coniferílico, constitui cerca de 85 – 90% de sua lignina, enquanto que para as folhosas, os álcoois sinalíptico e coniferílico encontram-se, praticamente, nas mesmas proporções, variando entre 0,5 – 4 unidades siringil e guaiacil (KAMM; GRUBER; KAMM, 2016; LIU; JIANG; YU, 2015; ZAKZESKI et al., 2010).

No intuito de se compreender melhor a relação entre os constituintes precursores da lignina no desempenho energético do combustível, pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de quantificar a relação entre as unidades dos monômeros siringil e guaiacil (S/G) e a influência no valor energético gerado pela combustão.

Estudos realizados por Soares et al. (2014) apontaram uma correlação negativa entre a relação S/G e a relação C/H, sendo este resultado explicado pela estrutura química das moléculas siringil e guaiacil. As unidades guaiacil apresentam maior relação C/H, uma vez que possuem um grupo metoxila a menos em comparação a molécula siringil, o que possibilita a formação de ligações C–C com outros grupos guaiacil, elevando seu grau de polimerização e sua estabilidade.

Portanto, uma menor relação S/G, significa que existe mais unidade guaiacil na macromolécula, logo, maior será a proporção entre os teores percentuais de carbono e hidrogênio na madeira (SOARES et al., 2015).

Deste modo, entende-se que madeiras que apresentam menores relações S/G podem apresentar maior valor calórico, com base nos estudos de (ARAÚJO et al., 2016; PEREIRA et al., 2013; SOARES et al., 2014, 2015), uma vez que o carbono é o principal elemento químico combustível.

#### 2.3.4.3 Composição química imediata da madeira

Os materiais voláteis correspondem aos gases oriundos da decomposição térmica das biomoléculas que compõem a biomassa lignocelulósica, que ao se misturarem com o oxigênio do ar promovem uma combustão mais homogênea, sendo este influenciado pela temperatura, taxa de aquecimento e a composição química da madeira (BRAND, 2010; NOGUEIRA; LORA, 2003).

O conhecimento do teor de materiais voláteis é essencial para o planejamento dos aparelhos de conversão energética (fornos e caldeiras) e dimensionamento do volume de ar necessário para um bom fluxo dos gases, de modo que a combustão da biomassa ocorra de maneira completa e homogênea (GARCÍA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014).

A biomassa com elevado teor de materiais voláteis apresentará menor temperatura de ignição, ou seja, terá maior facilidade para incendiar e queimar. Nesse sentido, destaca-se que os voláteis durante a queima do combustível, se volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do mesmo dentro do aparelho de combustão, podendo contribuir para um baixo desempenho energético (CAI et al., 2017; LEWANDOWSKI; KICHERER, 1997).

Para Shen et al. (2010), a madeira apresenta teor de material volátil entre 70% a 87% e teor de carbono fixo entre 15% a 30%, sendo que essa variação pode ser explicada pelas diferenças nos teores de lignina, extrativos, holocelulose e seus respectivos comportamentos durante o aquecimento.

O carbono fixo representa a quantidade de carbono sólido após a liberação dos compostos voláteis excluindo-se a umidade e a cinza ao final do processo de combustão (CAI et al., 2017), apresentando relação direta com o teor de lignina.

Assim, quanto maior o conteúdo de lignina maior será o teor de carbono fixo, uma vez que essa macromolécula apresenta mais carbono em sua estrutura conferindo uma maior resistência a decomposição térmica (DEMIRBAS, 2001, 2003).

Os combustíveis com elevados teores de carbono fixo residem por mais tempo dentro do aparelho de queima, sendo preferíveis por queimarem lentamente, pois trata-se da fração orgânica não volátil que se oxida no estado sólido (BRAND, 2010).

Do ponto de vista energético a quantidade de carbono fixo presente na biomassa contribui para um incremento no valor calórico a ser liberado no processo de conversão energética, uma vez que o carbono sólido está fortemente ligado a outros átomos de carbono por ligações C–C ou C=C, que apresentam maior entalpia de ligação química (ATKINS; JONES, 2012).

O teor de cinzas é o percentual dos componentes minerais inorgânicos presentes na biomassa, provenientes principalmente da madeira e da casca, ou seja, é o resíduo resultante do processo de combustão dos componentes orgânicos do combustível lignocelulósico (BRAND, 2010; PROTÁSIO et al., 2011).

É indesejável que o combustível apresente elevados teores de cinzas quando a biomassa é destinada para a geração direta de calor ou produção de carvão vegetal, porque os minerais não participam do processo de combustão. As cinzas reduzem o poder calorífico do material, diminuem a inflamabilidade e a transferência de calor, além de aumentar a corrosão dos equipamentos e causar perdas de energia pelo aquecimento dos óxidos minerais (BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014).

O conhecimento do teor de cinzas permite avaliar o seu comportamento em diversos aspectos, um deles é o seu ponto de amolecimento e fusão. Processos de combustão que operam a elevadas temperaturas podem proporcionar um fenômeno denominado de fusibilidade das cinzas, que se trata da aglomeração do material particulado. Consequentemente, inviabilizam a continuidade do processo ou reduzem a eficiência da troca de calor no equipamento usado para a conversão energética (PROTÁSIO et al., 2014; RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008).



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O estudo foi realizado em plantios experimentais com diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* (Tabela 4) aos 55 meses de idade, localizados no município de Dom Eliseu, na mesorregião Sudeste Paraense.

TABELA 4 – MATERIAIS GENÉTICOS AVALIADOS NO EXPERIMENTO

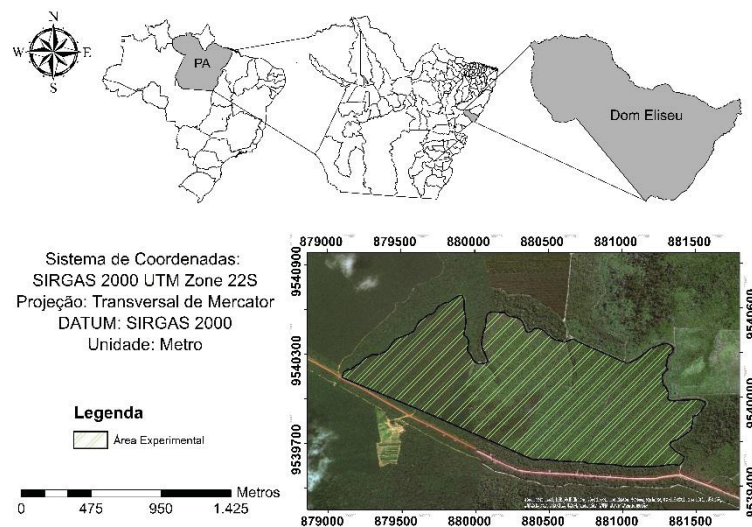
Nº	Clone	Descrição
1	C-406	<i>Eucalyptus urophylla</i>
2	C-408	<i>Eucalyptus urophylla</i>
3	C-432	Híbrido de polinização aberta
4	C-435	<i>Eucalyptus urophylla</i>
5	C-436	<i>Eucalyptus urophylla</i>
6	C-443	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus tereticornis</i>
7	C-455	Híbrido de polinização aberta
8	C-479	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>
9	C-490	<i>Eucalyptus urophylla</i>
10	C-500	Híbrido de polinização aberta

FONTE: O autor (2019).

A climatologia do Município, segundo Köppen é o Aw1, clima tropical chuvoso, com expressivo período de estiagem, sendo o trimestre mais secos entre os meses de julho a setembro e o mais chuvoso de fevereiro a abril (SIPAM, 2009). A temperatura média anual é de 25 °C e a precipitação média anual é de 1638 mm, entretanto, há uma amplitude climática na região, podendo a precipitação anual média variar de 1445 a 2030 mm dentro do município (HIJMANS et al., 2005).

O experimento foi instalado nos meses de janeiro e fevereiro de 2013 com espaçamento de 3 x 2 metros em uma área de 600 m<sup>2</sup> por material genético, localizado nas coordenadas UTM 880220 L e 9539788 S, Datum: SIRGAS 2000, Zona: 22S (Figura 5). A área experimental possui altitude de 260 m e o solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, textura muito argilosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2013).

FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL, SITUADA NA FAZENDA RIO CONCREM, DOM ELISEU, PARÁ



FONTE: O autor (2019).

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado com dez tratamentos (Clones) e três repetições (parcelas permanentes). As parcelas permanentes foram alocadas aleatoriamente no plantio e apresentavam nove árvores com área total de 54 m<sup>2</sup>.

A intensidade amostral do experimento para atender ao erro máximo de 5% foi determinado por meio da Equação 1. O número de classes diamétricas foi calculada a partir do método proposto por Sturges (1926) (Equação 2), sendo que esta apontou que seis é a quantidade ideal para representar o plantio experimental.

$$n = \frac{t^2 * CV^2}{E^2} \quad (1)$$

ONDE:

n = número de amostras;  
 t = valor tabelado de Student;  
 CV = coeficiente de variação;  
 E = erro máximo estipulado (5%).

$$n_c = 1 + 3,222 * \log_{10}(n) \quad (2)$$

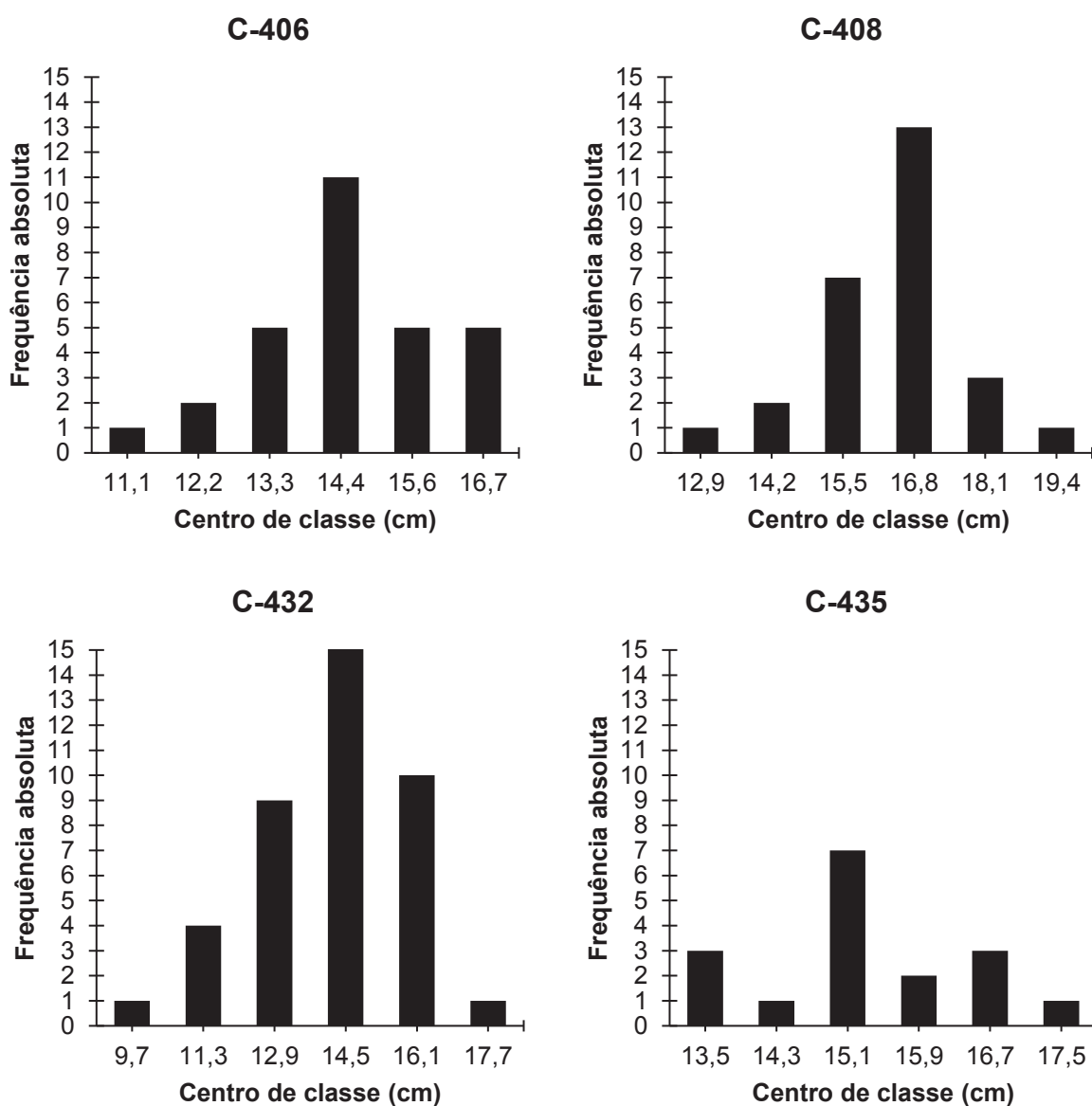
ONDE:

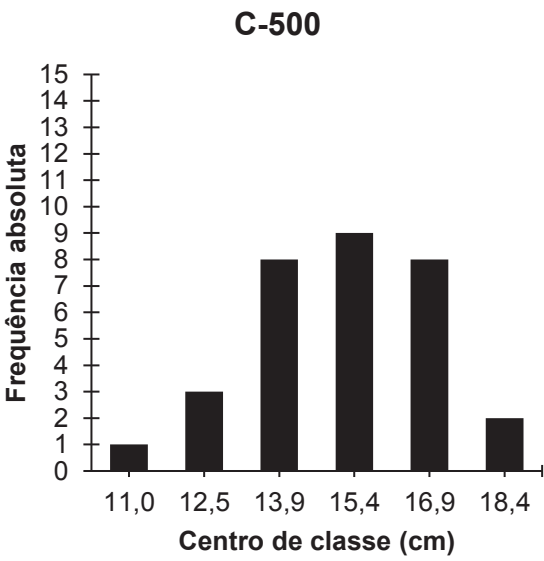
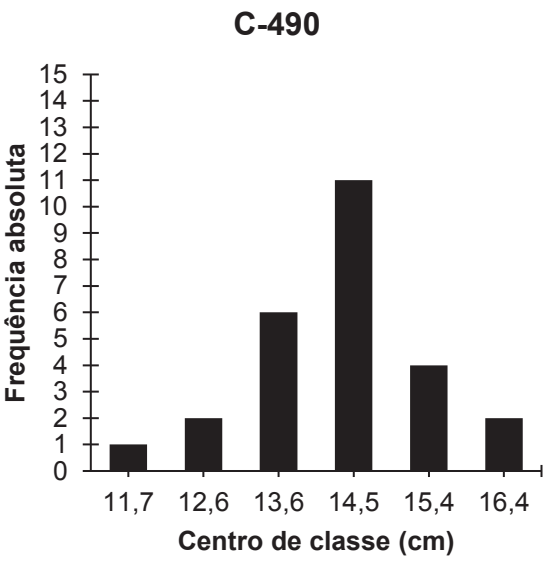
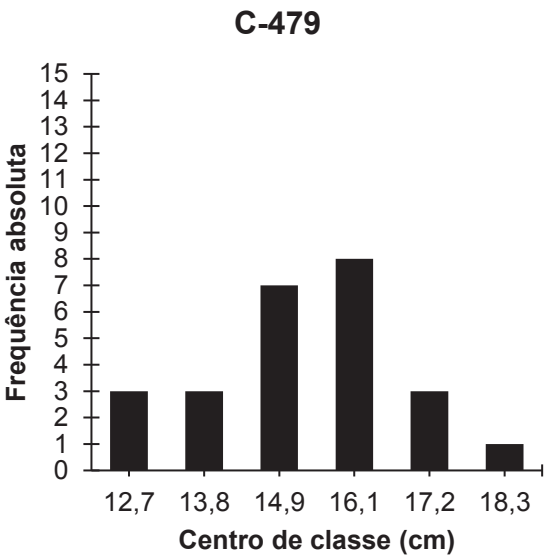
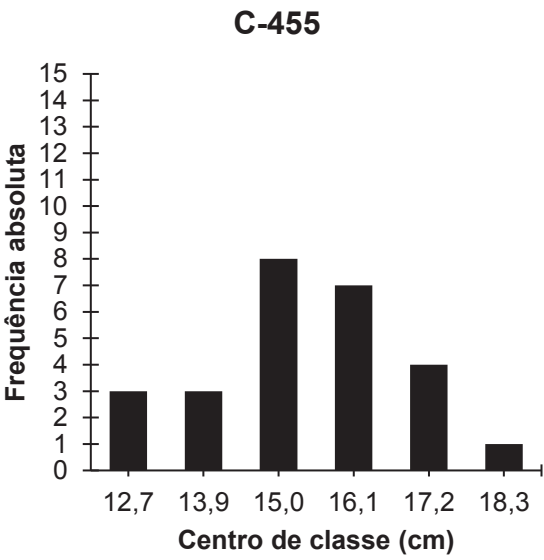
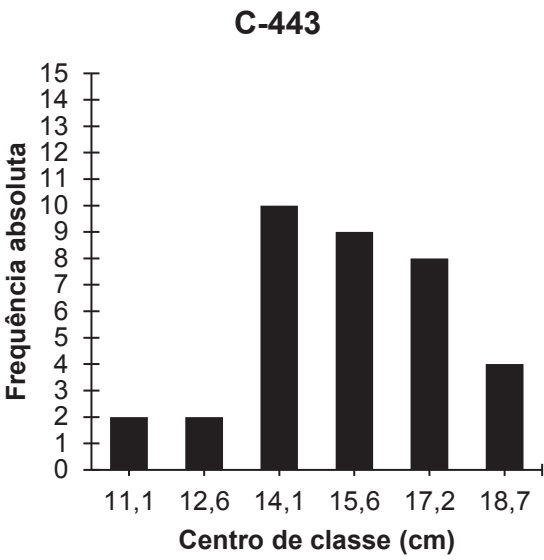
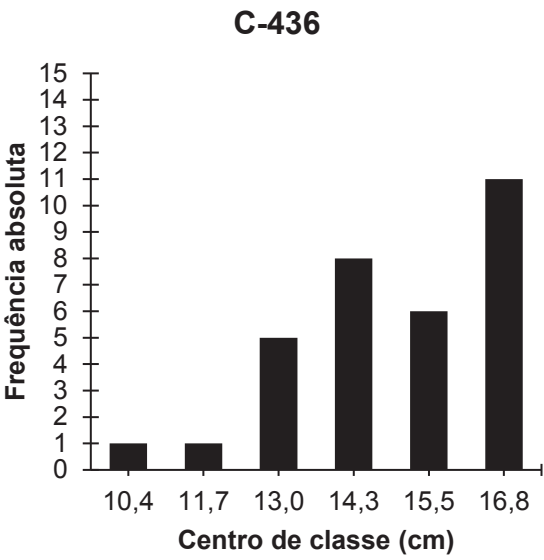
$n_c$  = número de classes;  
 n = número de dados.

### 3.2 BIOMASSA FLORESTAL

Com base nas informações do inventário florestal, foram cortadas seis árvores por clone, sendo uma árvore amostra por classe de diâmetro para determinação do volume individual e da biomassa verde acima do solo. Na Figura 6 estão representados os histogramas das distribuições diamétricas para cada material genético avaliado.

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA POR CLASSE DE DIÂMETRO PARA OS CLONES DE *EUCALYPTUS*





Os indivíduos selecionados foram cortados o mais próximo do solo possível (Figura 7a) e submetidos à cubagem rigorosa (Figura 7b), para obter os volumes individuais com casca, a partir da aplicação do método de Smalian, sendo este o mais utilizado para determinação de volume real (CORTE et al., 2016; HSING; DE PAULA; DE PAULA, 2016).

FIGURA 7 – CORTE E CUBAGEM RIGOROSA DOS INDIVÍDUOS SELECIONADOS



(a)



(b)

FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = execução do corte da árvore amostra o mais próximo ao solo possível, (b) = cubagem rigorosa do indivíduo após o corte.



Para a obtenção da biomassa verde acima do solo, aferiu-se a massa dos componentes separadamente com auxílio de uma balança digital com capacidade máxima nominal de carga de 50 kg e precisão de 0,01 kg. Após a realização da cubagem da árvore, primeiramente, foram coletados os galhos secos e pesados (Figura 8a e 8b).

FIGURA 8 – PESAGEM DA BIOMASSA VERDE DO COMPONENTE GALHO SECO DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*



(a)



(b)

FONTE: Autor (2019).

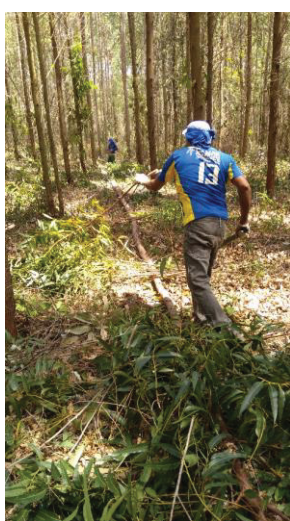
LEGENDA: (a) = coleta dos galhos secos ao longo do fuste, (b) = pesagem dos galhos secos.

Em seguida, os galhos verdes foram coletados (Figura 9a), mas antes de serem pesados, passavam por um processo de desfolha (Figura 9b). O procedimento foi realizado em cima de uma lona de plástico para que houvesse menores perdas e contaminação das folhas. Posteriormente, realizou-se as pesagens dos componentes galho verde e folha conforme ilustrado nas Figuras 9c e 9d, respectivamente.

FIGURA 9 – PESAGEM DA BIOMASSA VERDE DOS COMPONENTE GALHO VERDE E FOLHA DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*



(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = coleta dos galhos verdes ao longo do fuste, (b) = retirada das folhas dos galhos, (c) = pesagem dos galhos verdes, (d) = pesagem das folhas.



Após a retirada dos discos ao longo do fuste, as toras de madeira eram transportadas até a borda do talhão para a remoção e pesagem da casca (Figura 10a, 10b e 10c). Por fim, aferiu-se a massa de todo o lenho da árvore sem casca (Figura 10d).

FIGURA 10 – PESAGEM DA BIOMASSA VERDE DOS COMPONENTE CASCA E FUSTE DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*



(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = execução do corte para obtenção das toras, (b) = remoção da casca do fuste, c = pesagem da casca, d = pesagem do fuste.



Para as amostras de madeira do fuste foram retirados discos de 2,5 cm de espessura em cinco posições longitudinais, sendo elas a 2%, 10%, 30%, 50% e 75% da sua altura comercial, considerada até um diâmetro mínimo de 5 cm com casca (DOWNES et al., 1997). Para os demais componentes, foram obtidas amostras com cerca de 500 g, sendo estas pesadas de imediato para a quantificação da massa fresca em balança digital com precisão de 0,1 g (Figura 11).

FIGURA 11 – AMOSTRAS COLETADAS DE CADA COMPONENTE PARA A REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES EM LABORATÓRIO.



FONTE: Autor (2019).

Para a realização da secagem artificial e preparo das amostras, os materiais coletados foram transportados até as dependências da Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus de Parauapebas, onde foram secas em estufa com circulação forçada de ar a  $103 \pm 5$  °C até atingirem massa constante (Figura 12). De posse dos dados, a biomassa seca por componente foi calculada por meio da equação (3).

$$BIO = MU_i \cdot \frac{MS_i}{MU_{ai}} \quad (3)$$

ONDE:

BIO = Biomassa seca por componente (kg);  
 MU<sub>i</sub> = Massa verde por componente (kg);  
 MS<sub>i</sub> = massa seca da amostra (kg)  
 MU<sub>ai</sub> = Massa verde da amostra (kg).

FIGURA 12 – SECAGEM DAS AMOSTRAS EM ESTUFA COM CIRCULAÇÃO FORÇADA DE AR.



FONTE: Autor (2019).

### 3.3 TÓPICO I: MODELAGEM DO ESTOQUE DE BIOMASSA E CLASSIFICAÇÃO PRELIMINAR DOS CLONES

Neste tópico foi realizada a análise da contribuição de cada componente da árvore (casca, folha, galho seco, galho verde e fuste) no estoque de biomassa total e dos coprodutos. Em seguida, foi realizado ajustes de modelos matemáticos para a estimativa do estoque em massa seca total e a classificação dos clones de *Eucalyptus* em função do estoque de energia potencial por hectare.

#### 3.3.1 Processamento dos dados

Foram mensuradas um total de 60 árvores amostras tomando-se os diâmetros em posições fixas de 0,10 m, 0,50 m, 1,30 m, 2,00 m e, a partir desta, a cada 2,00 metros até a altura comercial, considerada até 5 cm de diâmetro. Em seguida foi realizado o cálculo do volume rigoroso a partir do método de Smalian (Equação 4).

$$v = v_0 + \sum \frac{g_1 + g_i + 1}{2} \cdot l_i + g_n \cdot l_n \cdot \frac{1}{3} \quad (4)$$

ONDE:

v= volume total; v<sub>0</sub>= volume do toco;  
 g<sub>i</sub>= área basal da i-ésima posição;  
 l<sub>i</sub>= comprimento da secção na i-ésima posição;  
 g<sub>n</sub>= área basal do cone; l<sub>n</sub>= comprimento do cone.

A modelagem do estoque de biomassa teve como variável dependente a massa seca total (MST) de cada indivíduo mensurado, obtido a partir do somatório das massas secas calculadas para cada componente (Equação 5).

$$MST = B_F + B_{GS} + B_{GV} + B_{FL} + B_C \quad (5)$$

ONDE:

MST = massa seca total (kg);  
 $B_F$  = biomassa seca do fuste (kg);  
 $B_{GS}$  = biomassa seca de galho seco (kg);  
 $B_{GV}$  = biomassa seca de galho verde (kg);  
 $B_{FL}$  = biomassa seca de folha (kg)  
 $B_C$  = biomassa seca de casca (kg).

### 3.3.2 Ajuste dos modelos

Para a estimativa da massa seca total, os dados foram segregados, em que 80% foi destinado ao ajuste dos modelos e os outros 20% para a validação das equações ajustadas. Portanto, foram ajustados 8 modelos estatísticos tradicionais (Tabela 5), com o auxílio do *Software Microsoft Excel* 2016, para a obtenção dos coeficientes da regressão, indicadores de qualidade dos ajustes e da análise gráfica dos resíduos.

TABELA 5 – MODELOS ESTATÍSTICOS AJUSTADOS PARA OS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Nº	Modelo	Estrutura
1	Linear	$y = \beta_0 + \beta_1$
2	Trorey (1932)	$y = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2$
3	Stoffels (1953)	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d)$
4	Curtis (1967)	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 (1/d)$
5	Schumacher & Hall (1933)	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(Ht)$
6	Spurr (1952)	$y = \beta_0 + \beta_1 (d^2 * Ht^2)$
7	Sanquetta et al. (2003)	$y = \beta_0 + \beta_1 (d^2) + \beta_2 (d^2 Ht)$
8	Chave et al. (2005)	$y = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(Ht) + \beta_3 \ln(Db)$

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Y = massa seca total; d = variável independente, diâmetro a 1,30 m do solo (cm);  
Ht = altura total (m); Db = densidade básica média do clone ( $\text{g cm}^{-3}$ ); ln = logaritmo natural.

Para a seleção do melhor modelo foram observados os seguintes critérios estatísticos: coeficiente de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ); erro padrão da estimativa em porcentagem ( $S_{yx\%}$ ) e análise gráfica dos resíduos, no intuito de verificar a ocorrência ou não de tendências nas estimativas da variável dependente.

O coeficiente de determinação ajustado foi empregado, porque este parâmetro desconsidera qualquer que seja o número de variáveis independentes (Equação 6), portanto, permite comparar os modelos entre si.

$$R_{aj}^2 = \left[ (1 - R^2) \left( \frac{n - 1}{n - p - 1} \right) \right] \quad (6)$$

ONDE:

$R_{aj}^2$  = coeficiente de determinação ajustado;  
 $n$  = número de observações;  
 $p$  = número de coeficientes do modelo matemático;  
 $R^2$  = coeficiente de determinação.

A estatística responsável por apontar a dispersão média entre os valores observados e estimados ao longo da linha de regressão é conhecida como erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), sendo que quanto menor o seu resultado, melhor terá sido o ajuste. No caso das equações em que a variável dependente sofreu transformação foi recalculado o erro padrão residual (Equações 7 e 8), no intuito de tornar viável a comparação dos modelos.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum (v_i - v_{iest.})^2}{n - p}} \quad (7)$$

$$S_{yx\%} = \left( \frac{S_{yx}}{\bar{v}} \right) * 100 \quad (8)$$

ONDE:

$S_{yx}$  = erro padrão da estimativa (Mg);  
 $v_i$  = volume observado (m³);  
 $v_{iest.}$  = biomassa seca total estimada (Mg);  
 $\bar{v}$  = média da biomassa seca total (Mg);  
 $n$  = número de observações;  
 $p$  = número de coeficientes do modelo matemático,  
 $S_{yx\%}$  = erro padrão da estimativa em porcentagem.

No intuito de eliminar a discrepância logarítmica ocasionada pela transformação da variável dependente utilizando o logaritmo natural, utilizou-se o fator de correção de Meyer (FCM) (Equação 9), ou seja, multiplicou-se a biomassa seca total estimada de cada indivíduo arbóreo pelo fator de correção.

$$FCM = e^{0,5 \cdot S_{yx}^2} \quad (9)$$

ONDE:

$$e = 2,718281828$$

$$S_{yx} = \text{erro padrão da estimativa (Mg)}$$

Apesar dos parâmetros estatísticos dos ajustes serem bons indicadores para a escolha do modelo estatístico, a eficácia de qualquer um deles na avaliação de um modelo fica comprometida sem uma verificação do comportamento dos desvios em relação à curva de regressão.

Nesse sentido, Campos & Leite (2006), mencionam que tendências podem ocorrer em amplitude de classe ou mais variáveis independentes sem serem detectadas pelas estatísticas que medem a precisão, entretanto, tais convergências podem ser observadas ao realizar a análise gráfica dos resíduos.

### 3.3.3 Validação dos modelos

Os modelos ajustados foram submetidos a validação, em que se utilizou um total de 20 indivíduos selecionados aleatoriamente, em seguida, foram calculadas novas estatísticas de precisão para o conjunto de dados da validação.

Ao final procedeu-se a comparação entre as estatísticas de ajuste e precisão, bem como a aplicação do teste qui-quadrado ( $\chi^2$ ), ao nível de 95% de probabilidade (Equação 10).

$$\chi_{\text{calculado}}^2 = \sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad (10)$$

ONDE:

$$y_i = \text{Valor observado}$$

$$\hat{y}_i = \text{Valor estimado}$$

Os valores tabelados foram comparados com os valores calculados. Se o  $\chi_{\text{calculado}}^2$  for menor que o  $\chi_{\text{tabelado}}^2$ , aceita-se a hipótese de que o modelo utilizado para a estimativa é acurado e pode ser utilizado para gerar estimativas.

### 3.3.4 Classificação preliminar dos clones

O modelo estatístico mais acurado foi utilizado para estimar o estoque de biomassa seca total para cada material genético por hectare. Por conseguinte, calculou-se o estoque potencial em energia (EP) de cada clone a partir do produto da massa seca total pelo poder calorífico superior médio de cada material genético (Equação 11).

$$EP = \frac{MST_{clone} * PCS_{médio}}{10^3} \quad (11)$$

ONDE:

EP = estoque potencial em energia (Gcal ha<sup>-1</sup>)

MST = massa seca total do clone (Mg ha<sup>-1</sup>)

PCS<sub>médio</sub> = poder calorífico superior médio do clone (Mcal Mg<sup>-1</sup>)

### 3.3.5 Análise estatística do Tópico I

Os dados de massa seca total (MST) e estoque potencial em energia (EP), foram analisados com o auxílio do *software* R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018) utilizando o pacote “*ExpDes.pt*” (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2018), em que primeiramente, aplicou-se o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade da variância, em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) pelo teste F a 5% de significância e quando as diferenças foram significativas, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade, para comparação das médias e o agrupamento univariado dos clones.

O melhor grupo apontado pelo teste estatístico, composto pelos clones que apresentaram as maiores médias, foram selecionados para a realização dos demais ensaios de qualidade energética.

### 3.4 TÓPICO II: ANÁLISE DA QUALIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DOS CLONES SELECIONADOS

#### 3.4.1 Preparo das amostras

Para esta etapa, foi selecionada uma árvore amostra de cada classe intermediária, excluindo as duas menores e a maior classe de diâmetro, totalizando três indivíduos por clone. Os tratamentos estudados foram: fuste, coproduto com folha (CP-CFL) e coproduto sem folha (CP-SFL).

Os tratamentos CP-CFL e CP-SFL, foram formulados em laboratório para cada clone, baseando-se na mistura proporcional dos componentes que integram a parte dos coprodutos da árvore (folha, galho seco, galho verde e casca). Primeiramente, foi realizado o cálculo para se determinar a biomassa seca total dos coprodutos ( $Bio_{CP}$ ) de cada árvore (Equação 12).

$$Bio_{CP} = MST - B_F \quad (12)$$

ONDE:

$Bio_{CP}$  = Biomassa seca total de coprodutos (kg)

$MST$  = massa seca total da árvore (kg)

$B_F$  = biomassa do fuste (kg)

De posse dos dados referente a biomassa seca total de coprodutos e biomassa seca de cada componente da árvore, foi possível quantificar a contribuição percentual de cada componente (folha, galho seco, galho verde e casca) na composição da biomassa dos coprodutos ( $Bio_{CP}$ ) (Equação 13).

$$\%_{componente} = \frac{Bio_{componente}}{Bio_{cp}} \quad (13)$$

ONDE:

$\%_{componente}$  = contribuição percentual de cada componente na biomassa seca total de coprodutos (%)

$Bio_{componente}$  = biomassa seca do componente (kg);

$Bio_{cp}$  = biomassa seca total de coprodutos (kg)

Em seguida, foi calculado a quantidade de cada componente necessário para preparar uma amostra de 30 g, de modo que representasse a proporcionalidade de



cada componente na biomassa de coprodutos, garantindo a formulação de uma amostra composta representativa do todo (Equação 14).

$$X_{componente} = 30 * \%_{componente} \quad (14)$$

ONDE:

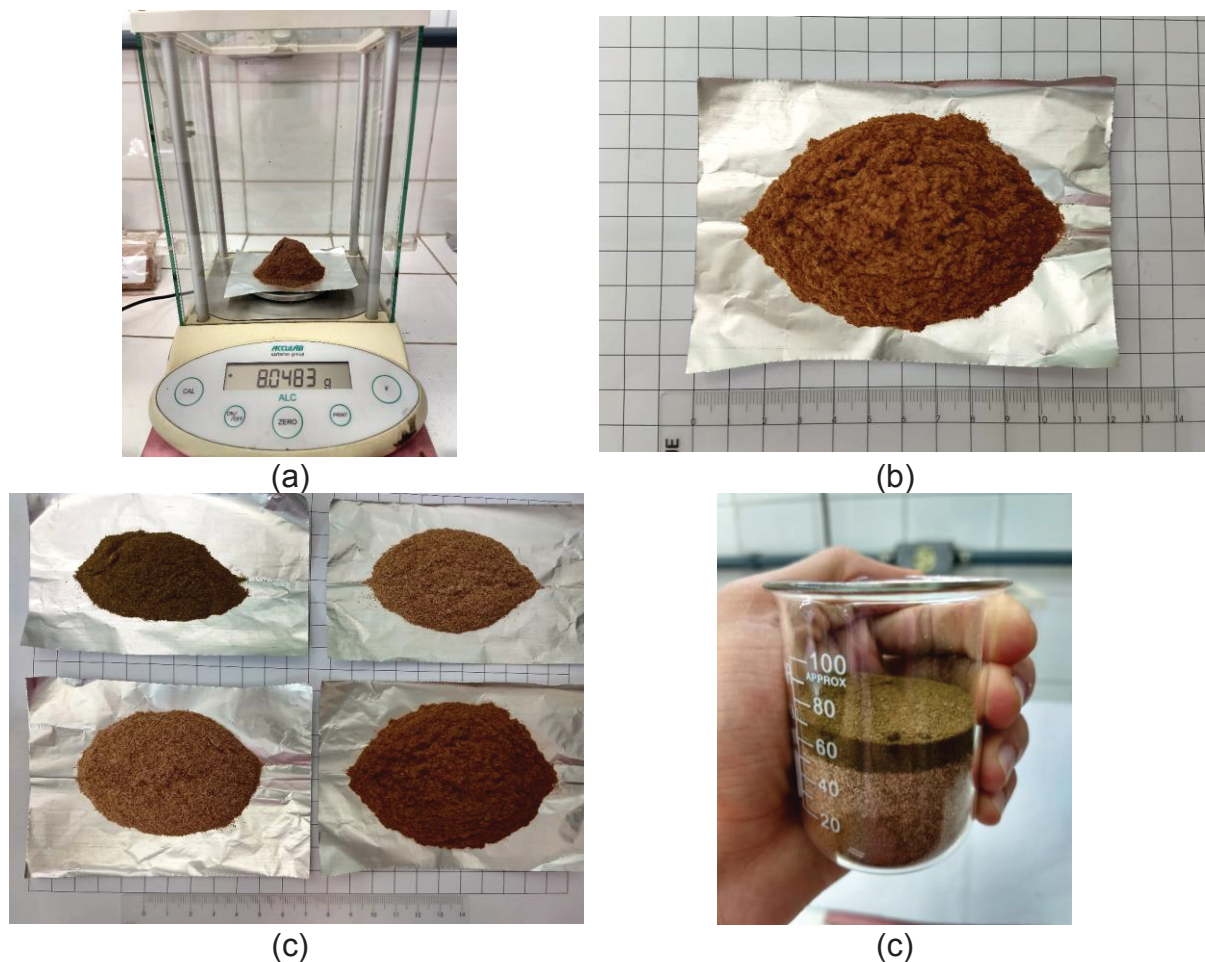
$X_{componente}$  = massa do componente a ser acrescentada para a formulação (g)

30 = massa total da amostra a ser preparada (g)

$\%_{componente}$  = contribuição percentual de cada componente na biomassa seca total de coprodutos (%)

De posse dessas informações, a quantidade de cada componente foi pesada com auxílio de uma balança analítica de precisão de 0,0001 g e depois transferidos para um Becker de 100 mL para a homogeneização da amostra (Figura 13). Vale ressaltar que para o tratamento CP-SFL, aplicou-se a mesma metodologia, porém, não incluiu o componente folha na formulação.

FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE FORMULAÇÃO DAS AMOSTRAS DE COPRODUTOS COM FOLHA E SEM FOLHA



FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = aferição da massa do componente, (b e c) = componente já pesados aguardando para mistura, (d) = amostras no Becker para mistura.



### 3.4.2 Determinação da densidade básica da madeira

Os discos retirados das árvores foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula. As duas menores cunhas opostas foram utilizadas na determinação da densidade básica da madeira de acordo com a metodologia proposta pela NBR 11941 (ABNT, 2003). A densidade básica média da árvore foi obtida, a partir da média aritmética, considerando as cinco posições de amostragem longitudinal no tronco as árvores.

As outras duas cunhas opostas foram utilizadas, para a retiradas de amostras, para a determinação da química macromolecular e análise energética da biomassa.

### 3.4.3 Análise química macromolecular

A composição química macromolecular consistiu em determinar o percentual de extrativos totais a partir da adaptação da norma T204 cm-97 (TAPPI, 2007), lignina klason insolúvel e lignina solúvel conforme as metodologias propostas por Gomide & Demuner (1986) e Goldschimid (1971), respectivamente, o método está descrito no Apêndice 1. A holocelulose foi obtida por diferença de acordo com a Equação 15 e os ensaios foram realizados em duplicata.

$$\text{Holocelulose} = 100 - (\text{EXT} + \text{LT} + \text{CZ}) \quad (15)$$

ONDE:

EXT = extrativos totais (%)

LT = lignina total (%), resultante do somatório das ligninas insolúvel e solúvel

CZ = teor de cinzas da amostra (%)

### 3.4.4 Análises energéticas

Para a determinação da qualidade energética dos componentes as amostras foram moídas e classificadas em peneiras, sendo utilizada, para o ensaio, a fração que ficou retida na peneira de 60 *mesh*.

O poder calorífico superior (PCS), base massa seca, foi determinado em um calorímetro marca Julius Peters, conforme a norma E711-87 (ASTM, 2004), para a realização da análise aferiu-se uma massa de aproximadamente 0,6 g previamente

seca em estufa (Figura 14a), o cadinho com a amostra foi acondicionado dentro de um vaso de aço inox (Figura 14b), em seguida o mesmo foi pressurizado com 20 Kgf cm<sup>-2</sup> de gás oxigênio com 99,95% de pureza (Figura 14c). Por fim, colocado no interior do equipamento onde ficou submerso em água com temperatura de aproximadamente 22 °C e com auxílio de um termômetro analítico realizou-se a leitura da variação da temperatura da água após a ignição do material durante 20 minutos (Figura 14d).

FIGURA 14 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DAS AMOSTRAS



(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = aferição da massa da amostra, (b) = vaso utilizado para o ensaio, (c) = pressurização do vaso com oxigênio, (d) = calorímetro marca Julius Peters.

O poder calorífico inferior (PCI), base massa seca, foi estimado, de acordo com a Equação 16.

$$PCI = PCS - \left( \frac{600 * 9H}{100} \right) \quad (16)$$

ONDE:

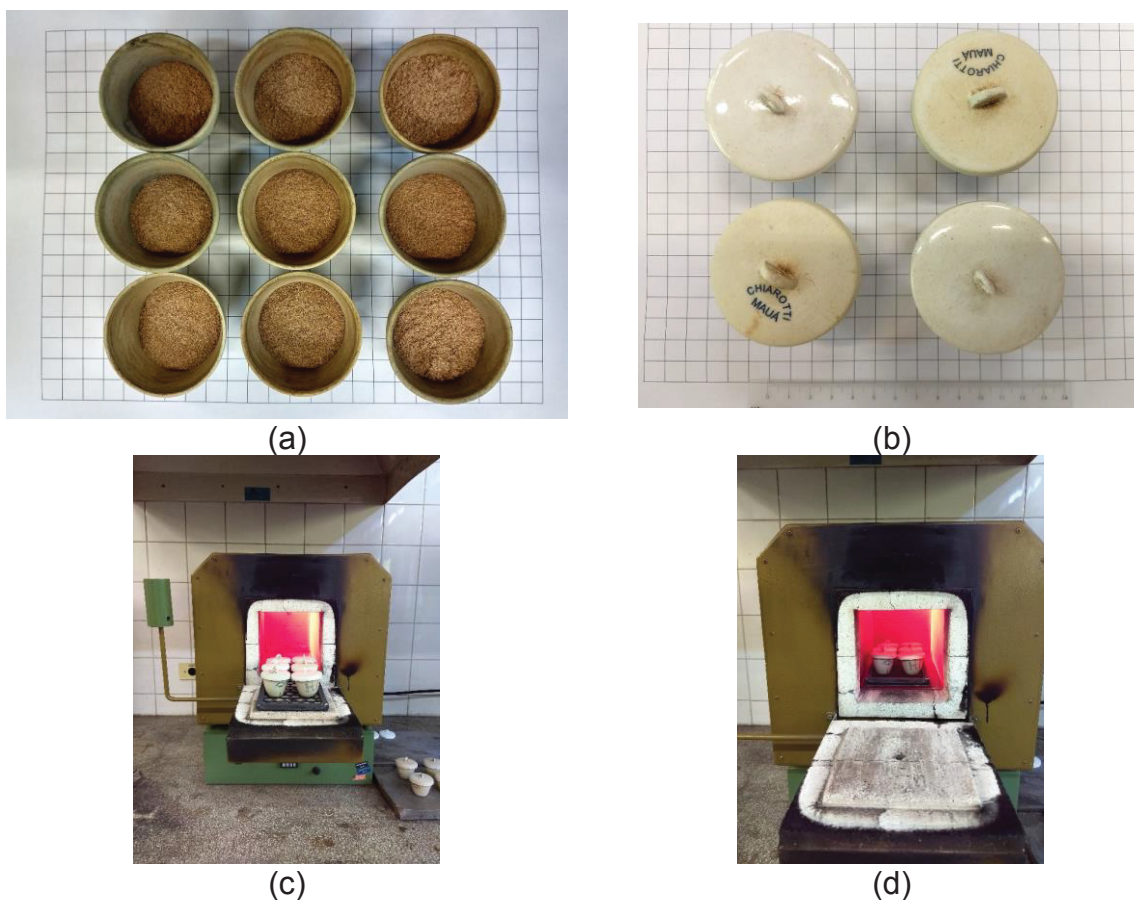
PCI = poder calorífico inferior (kcal kg<sup>-1</sup>)

PCS = poder calorífico superior (kcal kg<sup>-1</sup>)

H = teor de hidrogênio da biomassa, neste trabalho considerado igual a 6%

O teor de materiais voláteis (MV) foi determinado seguindo as recomendações da normativa americana E872-82 (ASTM, 2013a), onde aferiu-se uma amostra de 3 g em cadinho de porcelana (Figura 15a) e com os mesmos tampados (Figura 15b), as amostras foram submetidas ao ensaio de degradação térmica em mufla elétrica a 900 °C divididos em duas etapas, sendo 3 minutos na porta do equipamento (Figura 15c) e 7 minutos no seu interior com a porta fechada (Figura 15d), totalizando um ensaio de 10 minutos.

FIGURA 15 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS DAS AMOSTRAS.

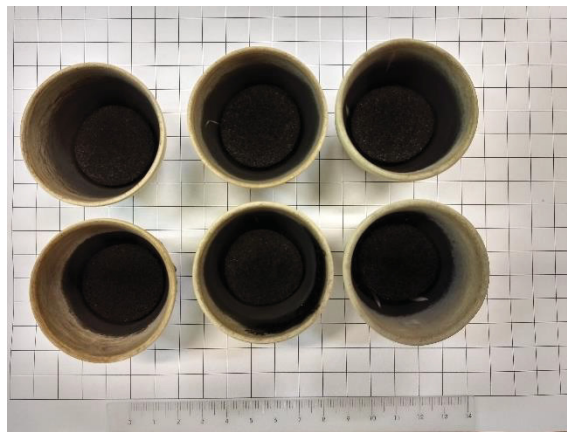


FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = amostra antes do ensaio, (b) = cadinhos tampados visando a liberação somente dos voláteis, (c) = cadinho no pré-aquecimento, (d) = cadinhos no interior da mufla.

Em seguida, com a amostra livre de voláteis (Figura 16a), a mesma foi acondicionada dentro de um forno mufla durante 6 horas com temperatura de 700 °C para a determinação do teor de cinzas (CZ) (Figuras 16b, 16c e 16d), de acordo com a norma D1184-84 (ASTM, 2013b).

FIGURA 16 – ILUSTRAÇÃO DO ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DAS AMOSTRAS



(a)



(b)



(c)



(d)

FONTE: Autor (2019).

LEGENDA: (a) = amostra livre de voláteis representando o coque, que é carbono + cinzas, (b) = organização dos cadinhos dentro da mufla, (c) = ensaio de oxidação do carbono fixo a 700 °C visando obter o teor de cinzas, (d) = cadinho com as cinzas.

Por fim, o teor de carbono fixo (CF) foi estimado de acordo com a Equação 17, da normativa americana E870-82 (ASTM, 2013c).

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad (17)$$

ONDE:

CF = teores de carbono fixo;  
MV = materiais voláteis  
CZ = cinzas, expresso em %.

### 3.4.5 Análise estatística do Tópico II

Nesta etapa o experimento foi avaliado em delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial de 4x3, com quatro clones e três componentes (fuste, CP-CFL e CP-SFL) e com três repetições (árvores amostras). Os dados foram analisados com o auxílio do *software* R versão 3.5.1 (R CORE TEAM, 2018) utilizando o pacote “*ExpDes.pt*” (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2018), em que primeiramente, aplicou-se o teste de Bartlett para verificar a homogeneidade da variância, em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) pelo teste F a 5% de significância e quando as diferenças foram significativas, aplicou-se o teste de Tukey a 95% de probabilidade para comparação das médias.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para um melhor entendimento e assegurar as respostas aos objetivos propostos, a redação dos resultados foi estruturada em dois tópicos principais:

- a) Tópico I – Modelagem do estoque de biomassa e classificação preliminar dos clones de *Eucalyptus*.
- b) Tópico II – Análise energética da biomassa dos clones selecionados.

### 4.1 TÓPICO I: MODELAGEM DO ESTOQUE DE BIOMASSA E CLASSIFICAÇÃO PRELIMINAR DOS CLONES

Na Tabela 6 estão um resumo dos valores médios das variáveis dendrométricas, verificou-se que os materiais apresentaram variação nos resultados para DAP (11,99 – 16,24 cm) e HT (18,86 – 24,18 m) e na produção volumétrica o clone C-435 foi o que obteve a menor média 18,69 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

TABELA 6 – MÉDIA DAS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS, VOLUME E DENSIDADE BÁSICA DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Clone	DAP (cm)	Altura Total (m)	Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Densidade Básica (kg m <sup>-3</sup> )
C-406	13,91 ± 0,42*	23,01 ± 0,24	35,27 ± 4,42	488,67 ± 0,49
C-408	16,24 ± 0,37	24,18 ± 0,10	46,32 ± 7,35	464,75 ± 0,33
C-432	11,99 ± 0,54	18,86 ± 0,41	29,99 ± 6,58	517,29 ± 0,61
C-435	15,48 ± 0,35	21,82 ± 0,31	18,69 ± 2,50	481,58 ± 0,43
C-436	13,65 ± 0,46	21,53 ± 0,33	38,31 ± 5,86	454,02 ± 0,88
C-443	14,46 ± 0,58	21,07 ± 0,60	35,02 ± 4,54	437,64 ± 0,62
C-455	15,66 ± 0,40	23,07 ± 0,13	43,18 ± 5,72	486,34 ± 0,79
C-479	15,50 ± 0,38	22,78 ± 0,18	35,64 ± 4,42	525,35 ± 0,34
C-490	14,15 ± 0,31	22,74 ± 0,15	38,20 ± 5,42	446,61 ± 0,53
C-500	14,39 ± 0,52	22,78 ± 0,45	37,62 ± 4,38	472,91 ± 0,36

FONTE: O autor (2019)

LEGENDA: \* = Erro padrão.

#### 4.1.1 Participação dos componentes no estoque de massa seca total e na biomassa de coprodutos total dos clones de *Eucalyptus*

A massa seca total acima do solo é o somatório das massas secas de todos os componentes que compõem o indivíduo arbóreo. Na Tabela 7, encontram-se os valores médios em massa seca por componente, bem como a massa seca total e a

biomassa de coprodutos total proveniente das árvores amostradas dos clones em estudo.

TABELA 7 – MÉDIA DA BIOMASSA SECA DOS COMPONENTES DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Clone	Casca	Folha	Galho seco	Galho verde	Fuste	MST	Biomassa Coprodutos Total
Mg ha <sup>-1</sup>							
C-455	8,43 ± 0,42*	5,95 ± 0,38	4,82 ± 0,42	6,62 ± 0,39	107,25 ± 1,54	133,08 ± 1,73	25,82 ± 0,19
C-408	8,51 ± 0,56	3,05 ± 0,27	2,75 ± 0,26	5,71 ± 0,43	108,94 ± 1,82	128,96 ± 1,98	20,02 ± 0,17
C-479	8,58 ± 0,36	3,51 ± 0,24	5,16 ± 0,34	3,87 ± 0,25	94,91 ± 1,23	116,03 ± 1,36	21,12 ± 0,13
C-500	8,86 ± 0,38	3,76 ± 0,25	1,74 ± 0,23	5,56 ± 0,30	89,50 ± 1,14	109,41 ± 1,28	19,91 ± 0,14
C-436	8,82 ± 0,53	3,43 ± 0,31	2,27 ± 0,24	4,42 ± 0,33	85,76 ± 1,49	104,70 ± 1,65	18,93 ± 0,16
C-490	6,69 ± 0,35	3,74 ± 0,31	4,14 ± 0,35	3,44 ± 0,28	86,52 ± 1,35	104,52 ± 1,50	18,01 ± 0,15
C-406	6,10 ± 0,30	3,45 ± 0,24	1,27 ± 0,24	4,12 ± 0,24	87,50 ± 1,16	102,43 ± 1,25	14,93 ± 0,01
C-432	6,86 ± 0,53	4,38 ± 0,46	4,38 ± 0,38	4,84 ± 0,48	76,08 ± 1,77	96,54 ± 1,99	20,46 ± 0,23
C-443	7,02 ± 0,33	2,66 ± 0,25	3,59 ± 0,27	3,80 ± 0,26	79,14 ± 1,13	96,20 ± 1,23	17,06 ± 0,10
C-435	5,36 ± 0,21	1,91 ± 0,14	0,65 ± 0,07	2,90 ± 0,16	41,69 ± 0,62	52,51 ± 0,67	10,82 ± 0,05

FONTE: O autor (2019).

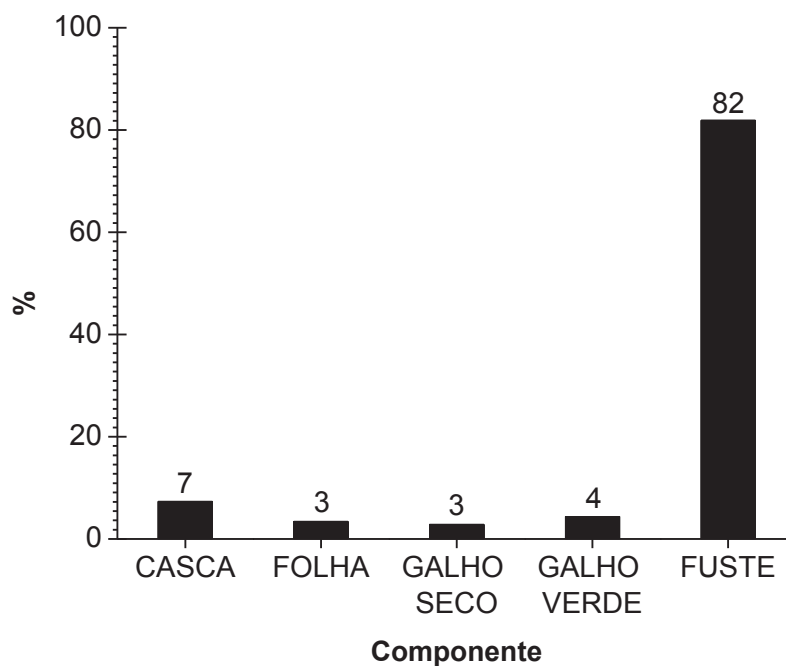
LEGENDA: \* = Erro Padrão.

Os clones analisados apresentaram uma elevada variação (CV = 86%) para a massa seca total, sendo que o menor resultado foi encontrado para o C-435 (52,51 Mg ha<sup>-1</sup>) e o maior valor para C-455 (133,08 Mg ha<sup>-1</sup>). Esse resultado evidencia que apesar dos materiais estarem implantados no mesmo sítio e pertencerem ao mesmo gênero nem todos obtiveram uma boa adaptabilidade a região, refletindo diretamente em sua produção.

A biomassa total dos coprodutos apresentou resultados variando entre 10,82 – 25,82 Mg ha<sup>-1</sup>, para C-435 e C-455 respectivamente, esta variável é influenciada principalmente pela biomassa que compõe a copa (folha, galho seco e galho verde) e a casca de todo o indivíduo.

A distribuição média da MST entre os componentes das árvores amostras podem ser verificadas na Figura 17. Observou-se que o fuste é o maior contribuinte em matéria seca nos indivíduos arbóreos, sendo que este resultado já era esperado uma vez que a formação de xilema secundário é o principal produto da atividade fotossintética, podendo haver variações influenciadas por fatores genéticos do indivíduo e edafoclimáticos do ambiente.

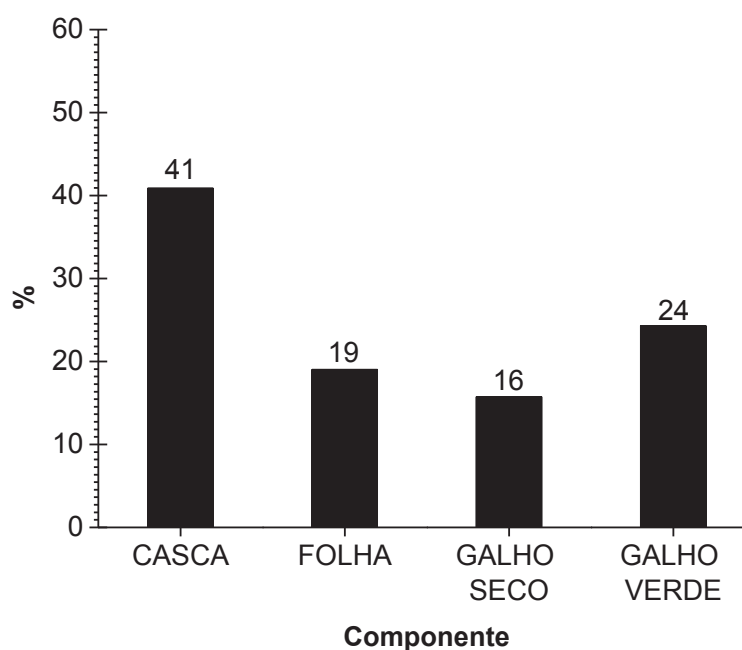
FIGURA 17 – PARTICIPAÇÃO DOS COMPONENTES NA MASSA SECA TOTAL DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*



FONTE: Autor (2019).

Para a biomassa total dos coprodutos o componente que apresentou uma maior participação foi a casca com 41%, seguido pelos componentes galho verde e folha que tiveram seus valores médios variando entre 24% e 19%, respectivamente (Figura 18).

FIGURA 18 – PARTICIPAÇÃO DOS COMPONENTES NA MASSA SECA TOTAL DOS COPRODUTOS DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*



FONTE: Autor (2019).



Os altos valores percentuais encontrados para casca e folha podem refletir no desempenho energético deste combustível, uma vez que estes componentes apresentam elevados teores de materiais inorgânicos em sua composição química, podendo influenciar negativamente na quantidade de energia a ser liberada durante o processo de combustão completa desses coprodutos.

#### 4.1.2 Ajustes dos modelos estatísticos para estimativa do estoque em massa seca total

Os valores da estatística descritiva das variáveis dependentes e independentes dos 60 indivíduos amostrados e utilizados nos testes estão apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS DEPENDENTES E INDEPENDENTES UTILIZADAS NOS AJUSTES DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

Variável	Mín.	Méd.	Máx.	DP	EP	Variância
MST	16,26	93,00	192,17	37,34	4,82	1394,02
DAP	8,02	14,54	19,48	2,45	0,32	6,02
HT	13,90	22,18	26,28	2,52	0,31	5,66
DB	0,438	0,478	0,525	0,03	4x10 <sup>-4</sup>	7,4x10 <sup>-5</sup>

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: MST = massa seca total (kg), DAP = diâmetro à 1,30 m do solo, HT = altura total (m), DB = densidade básica (g cm<sup>-3</sup>), Min. = valor mínimo, Méd. = médio, Máx. = máximo, DP = desvio padrão ( $\pm$ ), EP = erro padrão.

Os coeficientes e os parâmetros estatísticos resultantes dos modelos matemáticos ajustados para a massa seca total estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 – ESTATÍSTICAS DE AJUSTE E PRECISÃO DOS MODELOS PARA ESTOQUE EM MASSA SECA TOTAL DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Modelo	Parâmetros				Ajuste		Validação	
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$R^2_{aj}$	Syx (%)	Syx (%)	$\chi^2_{cal.}$
Linear	-131,928	15,581			0,95	8,84	8,23	0,22
Trorey	-1,464 <sup>ns</sup>	-3,035 <sup>ns</sup>	0,644		0,97	7,66	7,83	0,61
Stofells	-2,639	2,662			0,96	8,12	8,49	0,45
Curtis	6,891	-34,347			0,96	8,66	7,21	0,68
Schumacher-Hall	-3,992	2,145	0,882		0,97	7,08	6,47	0,91
Spurr	-1,410 <sup>ns</sup>	0,019			0,97	7,01	6,10	0,94
Sanquetta	-7,729 <sup>ns</sup>	0,155 <sup>ns</sup>	0,014		0,97	6,98	6,37	0,91
Chave	-3,639	2,125	0,938	0,635	0,99	5,20	5,87	0,98

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: ns = não significativo a 5% de significância,  $R^2_{aj}$  = coeficiente de determinação ajustado,  $S_{yx\%}$  = erro padrão da estimativa em porcentagem.  $\chi^2_{cal.}$  = qui-quadrado calculado.

De modo geral as equações modeladas apresentaram um bom desempenho estatístico com erros variando entre 5,20% a 8,84%, e coeficientes de determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) oscilando de 0,95 a 0,99, evidenciando que as variáveis independentes dos modelos explicam mais de 95% do comportamento da variável dependente (MST) com um elevado grau de ajuste.

Ao avaliar o estoque de biomassa em clones de eucaliptos em Minas Gerais, Assis et al. (2015), encontraram bons índices de ajuste e precisão, onde a variável independente explicou mais de 98% do resultado obtido para massa seca total e que o erro padrão da estimativa juntamente com a análise gráfica do resíduo foram importantes para a tomada de decisão na seleção do melhor modelo matemático.

A análise de variância da regressão para os modelos de Trorey, Spurr e Sanquetta apontou não haver significância para alguns coeficientes do modelo, indicando que o mesmo não exerce uma contribuição na variável dependente, entretanto, foram mantidos no intuito de conservar a estrutura original e não penalizar as estatísticas de ajuste e precisão dos mesmos.

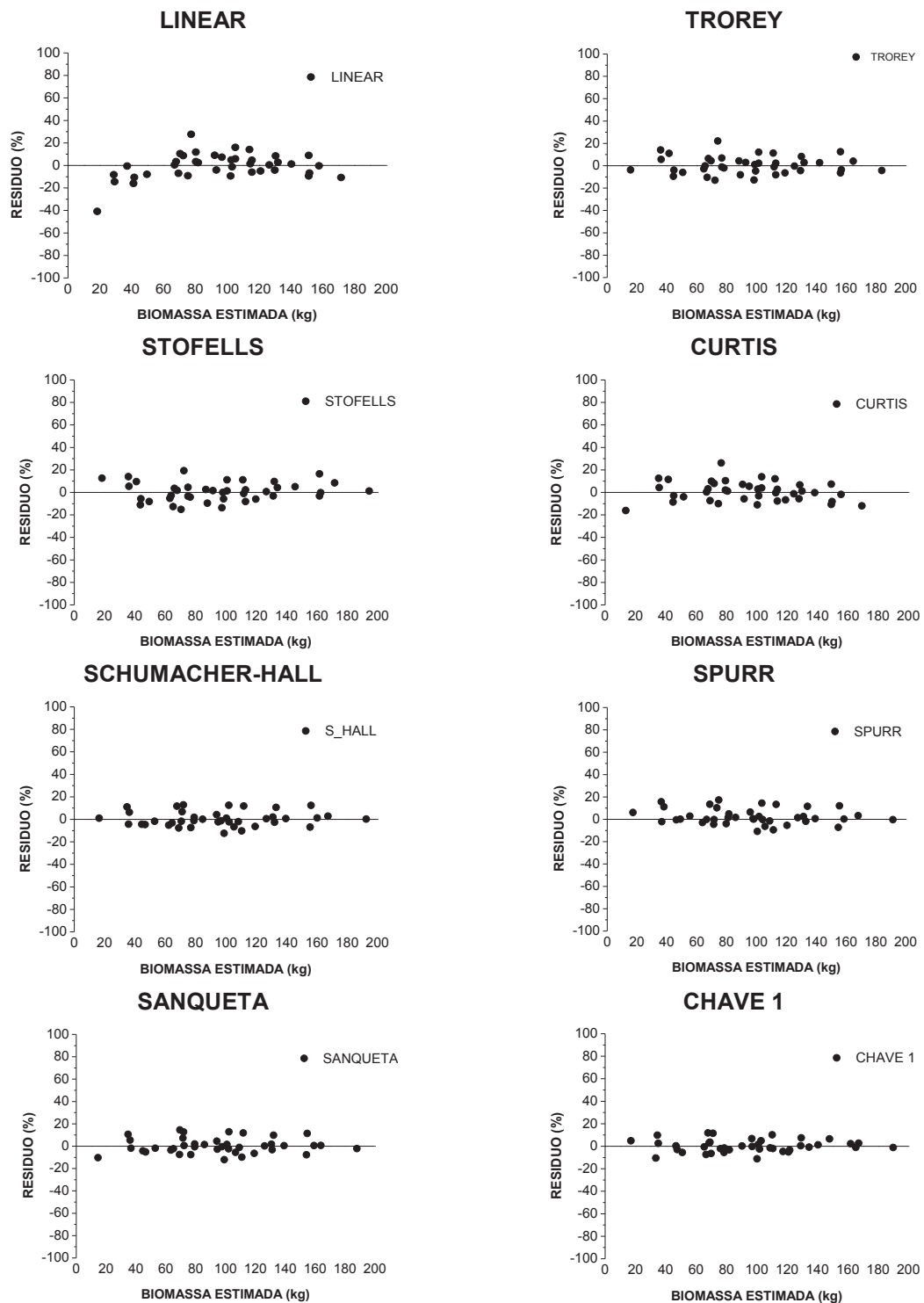
O modelo Linear, que utilizou apenas a variável DAP, foi o que apresentou as estatísticas de menor precisão comparado com os demais, apresentando um  $S_{yx\%}$  de 8,84% e  $R_{aj}^2$  de 0,95. Contudo, para o modelo matemático Chave, as variáveis independentes DAP, altura e densidade básica do clone, explicaram 99% ( $R_{aj}^2 = 0,99$ ) da estimativa de biomassa com menor erro padrão (5,20%).

A variável DAP apresenta uma expressiva influência na seleção de modelos para estimativa de biomassa, por ser de fácil e rápida mensuração além do baixo custo. Entretanto, ao utilizar a combinação de DAP e HT observa-se uma maior eficiência dos modelos ajustados (FONTOURA et al., 2017; MELO et al., 2014). Para Chave et al. (2005), a inclusão da densidade básica da madeira como variável independente tende a minimizar os erros das estimativas devido a sua determinação ser mais precisa.

O resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) calculados ao nível de 5% de significância apontou que todas as equações testadas se aderiram ao conjunto de dados, pois, os valores de  $\chi^2_{cal}$  foram inferiores ao  $\chi^2_{tab}$ , logo, quaisquer dos modelos validados poderá ser utilizado nas estimativas de massa seca total, entretanto, como já mencionado anteriormente, o modelo Chave mostrou-se mais acurado.

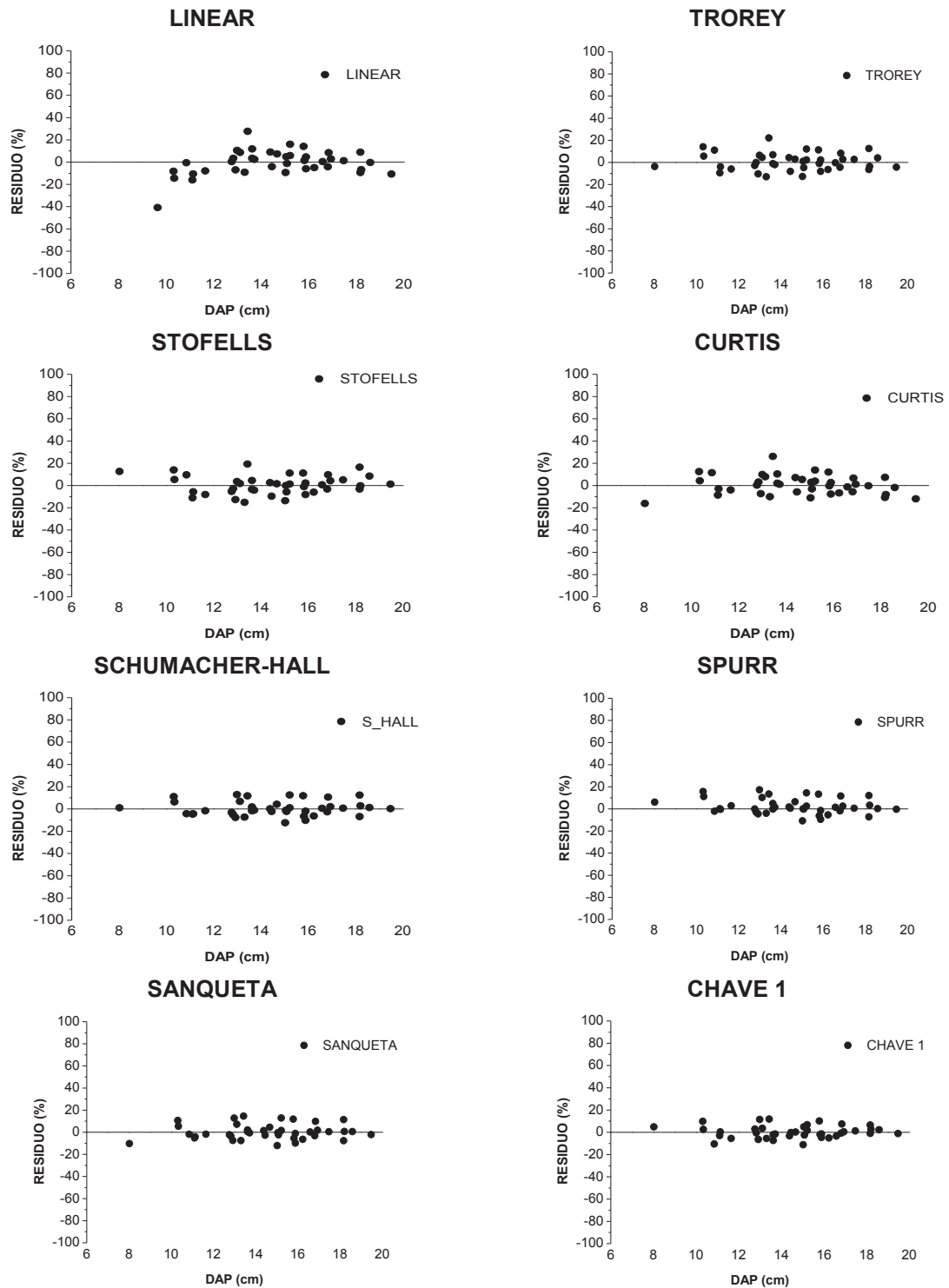
Para as equações ajustadas, elaborou-se gráficos de distribuição dos resíduos em função da massa seca estimada e DAP (Figura 19 e 20), no intuito de se verificar possíveis tendenciosidades.

FIGURA 19 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS TESTADOS EM FUNÇÃO DA MASSA SECA ESTIMADA.



FONTE: Autor (2019).

FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS PARA OS MODELOS TESTADOS EM FUNÇÃO DO DAP.



FONTE: Autor (2019).

O modelo Linear foi o que apresentou uma tendência em subestimar as estimativas de biomassa total, principalmente para indivíduos com DAP inferiores a 12 cm, reflexo dos 8,84% de erro padrão da estimativa apontado pela estatística de ajuste.

Com exceção do modelo Linear, a distribuição gráfica dos resíduos em função da biomassa estimada e do DAP para os demais modelos testados não apresentou tendenciosidades, principalmente para o modelo Chave 1, indicando que o mesmo é apropriado para a estimativa da variável dependente (massa seca total) em função do DAP, HT e DB.

#### 4.1.3 Classificação preliminar dos Clones

A estimativa de MST por hectare para os clones inventariados foi obtida a partir do modelo matemático Chave, uma vez que este apresentou melhores estatísticas de ajuste e precisão, conforme explicado no item anterior.

A análise de variância revelou haver diferença estatística entre os clones analisados (Tabela 10) para as variáveis MST e EP.

TABELA 10 – RESUMO ESTATÍSTICO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA SECA TOTAL E ESTOQUE EM ENERGIA POTENCIAL

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	
		Massa seca total (Mg ha <sup>-1</sup> )	Estoque em energia potencial (Gcal ha <sup>-1</sup> )
Clone	9	1601,63*	0,035742*
Erro experimental	29	199,93	0,004167
Homogeneidade		0,82	0,85
R <sup>2</sup>		0,71	0,73
CV (%)		13,72	13,63

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: \*Significante a 95% de probabilidade pelo teste F, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, CV = coeficiente de variação (%).

Na Tabela 11, o resultado do teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância, indicou o agrupamento univariado de três grupos distintos estatisticamente.

TABELA 11 – ESTOQUE DE MASSA SECA TOTAL E EM ENERGIA DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Clone	Massa seca total (Mg ha <sup>-1</sup> )	Estoque em energia potencial (Gcal ha <sup>-1</sup> )
C – 408	134,02 ± 1,01* A	0,601 ± 0,07 A
C – 455	121,15 ± 1,16 A	0,583 ± 0,08 A
C – 479	119,15 ± 0,91 A	0,571 ± 0,06 A
C – 500	113,09 ± 1,47 A	0,523 ± 0,10 A
C – 436	107,01 ± 1,18 B	0,479 ± 0,08 B
C – 490	102,46 ± 0,63 B	0,457 ± 0,04 B
C – 406	100,53 ± 1,17 B	0,468 ± 0,08 B
C – 443	100,05 ± 1,90 B	0,438 ± 0,13 B
C – 432	97,49 ± 1,01 B	0,457 ± 0,07 B
C – 435	55,47 ± 2,89 C	0,256 ± 0,20 C

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre os clones para o teste de Scott-Knott ( $p < 0,05$ ). \* = Erro padrão.

Para o estoque em massa seca total, o C-435 foi o material que apresentou o menor resultado (Grupo C) com uma produção de apenas 55,47 Mg ha<sup>-1</sup>, *in loco* verificou-se que este clone não teve uma boa adaptabilidade ao local, uma vez que seu percentual de sobrevivência aos 55 meses de idade foi de aproximadamente 47%, justificando a baixa produtividade em massa seca e, conseqüentemente, no estoque em energia (0,256 Gcal ha<sup>-1</sup>).

Os clones C-436, C-490, C-406, C-443 e C-432 formaram o grupo intermediário (Grupo B) para ambas as variáveis estudadas, com médias variando de 97,49 – 107 Mg ha<sup>-1</sup> de MST e 0,457 – 0,479 Gcal ha<sup>-1</sup> em EP.

Os materiais genéticos que apresentaram as maiores médias para MST e EP pertencem ao Grupo A, com valores variando de 113 – 134 Mg ha<sup>-1</sup> e 0,523 – 0,601 Gcal ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Dentre os clones desse grupo, o C-408 foi o que se destacou com um estoque em massa seca de 134 Mg ha<sup>-1</sup> e uma energia em potencial estocada de 0,601 Gcal ha<sup>-1</sup>.

A variável EP foi o critério adotado para uma seleção preliminar dos materiais avaliados, uma vez que indica a quantidade de energia estocada em sua fitomassa por hectare aos 55 meses de idade, auxiliando na escolha dos clones com potencial para o uso energético. Neste sentido, os clones C-408, C-455, C-479 e C-500 foram os que apresentaram o maior potencial para a produção de bioenergia, sendo estes os escolhidos para as análises subsequentes.

#### 4.1.4 Considerações do Tópico I

O fuste é o componente que mais contribuiu na produção de massa seca total dos clones, participando em média com 82% de massa seca e a casca foi responsável por 41% da massa seca total dos coprodutos.

O modelo estatístico de Chave apresentou os melhores parâmetros estatísticos e, conseqüentemente, melhor desempenho nas estimativas de massa seca total para os clones em análise.

O clone C-408 pode ser considerado o mais indicado, em princípio, para geração direta de energia, pois apresentou melhores resultados para produção de massa seca e estoque em energia por hectare.

Com base na classificação preliminar a partir das técnicas univariadas foram selecionados os clones C-408, C-455, C-479 e C-500 para as análises do tópico subsequente.

## 4.2 TÓPICO II: ANÁLISE ENERGÉTICA DA BIOMASSA DOS CLONES SELECIONADOS

Após a classificação preliminar dos clones, foram realizadas análises físicas, químicas e energéticas da biomassa visando obter a qualidade energética dos materiais.

### 4.2.1 Análise físico-química

Para a densidade básica, carbono orgânico e estoque em carbono orgânico na madeira dos materiais selecionados foi observado efeito significativo entre os clones (Tabela 12).

TABELA 12 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA DENSIDADE BÁSICA, CARBONO ORGÂNICO E ESTOQUE EM CARBONO ORGÂNICO NA MADEIRA DOS CLONE DE *EUCALYPTUS*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio		
		Densidade básica (kg m <sup>-3</sup> )	Carbono orgânico (%)	Estoque carbono orgânico na madeira (kg m <sup>-3</sup> )
Clone	3	0,0108227*	1,1714 x 10 <sup>-4</sup> *	2302,88*
Erro experimental	56	0,0005086	4,6080 x 10 <sup>-6</sup>	101,23
Homogeneidade	-	0,14	0,33	0,22
R <sup>2</sup>	-	0,53	0,58	0,55
CV (%)	-	4,63	0,48	0,22

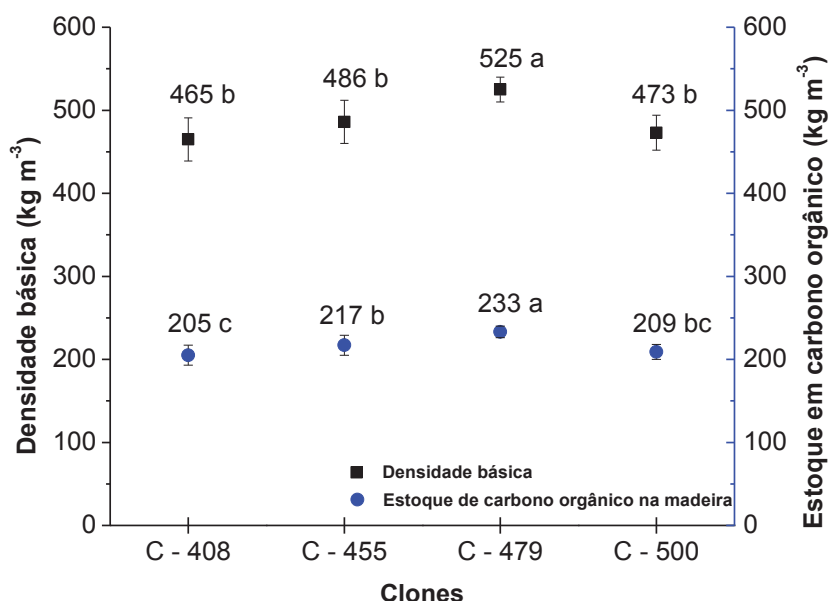
FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: \*Significativo a 95% de probabilidade pelo teste F, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, CV = coeficiente de variação (%).

Os valores de densidade básica variaram de 465 – 525 kg m<sup>-3</sup> (Figura 21), para C-408 e C-479, respectivamente, esses resultados foram semelhantes aos observados por Protásio et al. (2013) para clones de *Eucayptus grandis* W. Hill ex Maiden e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake (473 – 553 kg m<sup>-3</sup>) e Brun et al. (2018) para híbridos de *Eucalyptus pellita* x *Eucalyptus tereticornis* (490 – 550 kg m<sup>-3</sup>).



FIGURA 21 – DENSIDADE BÁSICA E ESTOQUE EM CARBONO ORGÂNICO NA MADEIRA DE CLONES DE *EUCALYPTUS*



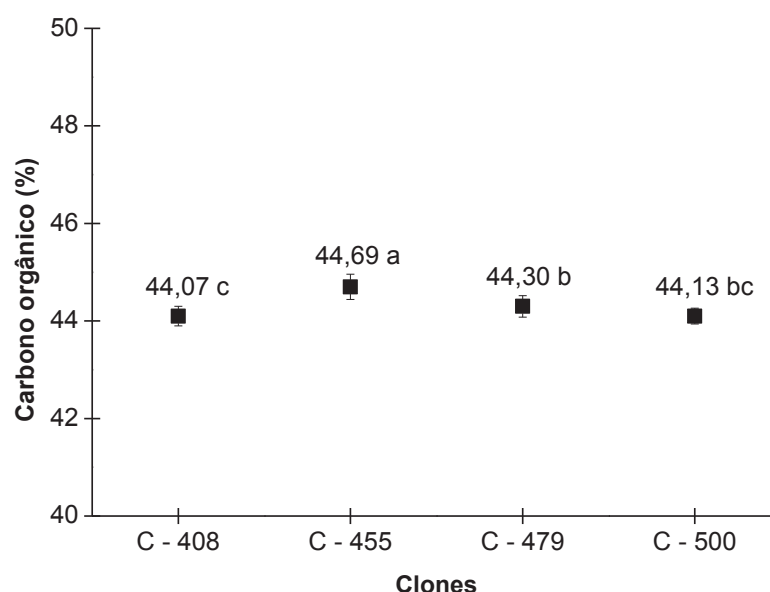
FONTE: Autor (2019).

Os resultados encontrados evidenciam o potencial desses materiais para a geração de energia térmica ou para a produção de carvão vegetal, uma vez que esta variável encontra-se diretamente relacionada com a produção de energia, sendo uma característica importante para a seleção de espécies para a queima direta da madeira (CARNEIRO et al., 2014).

O teste de comparação de médias de Tukey revelou haver diferença entre os materiais para o percentual de carbono orgânico (Figura 22), variando de 44,1 – 44,7%, para o C-500 e C-455, respectivamente, comportamento diferente do resultado encontrado para a densidade básica, em que o clone C-455 apesar do menor valor de DB em relação ao C-479 apresentou teor de carbono estatisticamente superior.

Entretanto, para o estoque em carbono orgânico por unidade de volume (Figura 21), verificou-se um comportamento semelhante ao observado para a densidade básica, em que os clones C-408, C-455 e C-500 apresentaram médias estatisticamente iguais, e o C-479 foi o responsável pelo maior estoque, com  $233 \text{ kg m}^{-3}$ .

FIGURA 22 – PERCENTUAL DE CARBONO ORGÂNICO NA MADEIRA DE CLONES DE *EUCALYPTUS*



FONTE: Autor (2019).

De acordo com Protásio et al. (2013), o estoque em carbono encontrado na madeira, por ser uma variável que considera duas características importantes (densidade e carbono), demonstra ser uma variável em potencial para a seleção de clones de *Eucalyptus* para produção de bioenergia e carvão vegetal.

Portanto, biomassas com maior estoque em carbono na sua composição elementar tendem a liberar mais energia por unidade de massa, uma vez que o carbono e o hidrogênio são os principais constituintes químicos combustíveis encontrados na biomassa lignocelulósica apresentando uma relação direta com o poder calorífico (DEMIRBAS, 2001, 2017; PROTÁSIO et al., 2011, 2013).

Para os elementos químicos macromoleculares a análise de variância revelou haver efeito significativo entre a interação dos fatores para as variáveis extrativos totais e holocelulose, ou seja, diferença entre os clones e os componentes (Tabela 13), entretanto, a lignina total apresentou efeito não significativo apontando que os fatores têm comportamentos estatisticamente independentes.

TABELA 13 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA EXTRATIVOS TOTAIS, LIGNINA TOTAL E HOLOCELULOSE DOS CLONE DE *EUCALYPTUS*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio		
		Extrativos totais (%)	Lignina total (%)	Holocelulose (%)
Clone	3	41,97*	10,97 <sup>NS</sup>	54,44*
Componente	2	654,09*	41,47*	887,71*
Clone x Componente	6	13,21*	3,91 <sup>NS</sup>	26,27*
Erro experimental	60	1,02	4,77	6,85
Homogeneidade	-	0,06	0,60	0,07
R <sup>2</sup>	-	0,96	0,33	0,84
CV (%)	-	10,48	9,29	4,03

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: \*Significativo a 95% de probabilidade pelo teste F, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, CV = coeficiente de variação (%).

Os extrativos correspondem aos constituintes não estruturais da biomassa lignocelulósica e dependendo da sua resistência a degradação térmica poderá colaborar para o incremento no valor calórico liberado pelo combustível durante o processo de combustão (SANTOS et al., 2016; SILVA et al., 2016).

Para esta variável, o fuste foi o que apresentou os menores resultados em relação aos componentes (Tabela 14), entre os materiais estudados se destaca o C-479 com 4,78%, enquanto que para CP-CFL e CP-SFL o clone C-500 apontou as maiores médias, correspondendo a 12,61% e 18,37%, respectivamente.

Analisando o efeito dos componentes dentro de cada nível clone observou-se que o tratamento CP-CFL apresentou as maiores médias e foi diferente estatisticamente de CP-SFL, isto indica que a utilização do componente folha implicou no aumento do teor de material extrativo do combustível e este comportamento pode ser relacionado a composição química da folha que é composta por cetonas, aldeídos, taninos e óleos essenciais.

Mendoza et al. (2015) encontraram teores de extrativos variando de 4,43% a 5,98% para *Eucalyptus nitens* cultivados na costa Oeste do México, Araújo et al. (2016) observaram resultados entre 2,10% a 4,31% para madeira de sete clones de *Eucalyptus* provenientes da região sudeste do Brasil e Wentzel et al. (2018) constataram que a madeira de *Eucalyptus nitens* da região de Biobío no Chile, apresenta 4,7% de extrativos totais, tais resultados vão de encontro aos observados nesta pesquisa.

Ao realizar a caracterização química de coprodutos de *Eucalyptus* provenientes de florestas de curta rotação destinadas para a produção de bioenergia

Teixeira et al. (2016) verificaram que as matérias-primas apresentaram de 12% a 16% de extrativos totais devido a utilização de componentes como folha, galhos e casca, sendo semelhante ao resultado observado neste estudo.

TABELA 14 – RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA MACROMOLECULAR DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Variável	Componente	Clone			
		C – 408	C – 455	C – 479	C – 500
Extrativos totais (%)	Fuste	3,33 ± 0,17 abC	3,21 ± 0,30 bC	4,78 ± 0,46 aC	4,65 ± 1,27 abC
	CP-CFL*	13,35 ± 0,35 bA	13,86 ± 0,26 bA	11,63 ± 1,09 cA	18,37 ± 0,18 aA
	CP-SFL	10,96 ± 1,06 bB	9,40 ± 1,71 cB	9,29 ± 0,29 cB	12,61 ± 2,17 aB
Holocelulose (%)	Fuste	72,50 ± 1,18 aA	72,11 ± 0,35 aA	68,58 ± 0,69 aA	71,38 ± 5,65 aA
	CP-CFL	60,86 ± 1,82 aC	59,62 ± 2,29 aC	60,91 ± 2,11 aB	54,54 ± 2,10 bC
	CP-SFL	64,90 ± 2,16 abB	67,29 ± 2,91 aB	65,65 ± 2,77 abA	61,68 ± 3,18 bB
Lignina total <sup>ns</sup> (%)	Fuste	23,98 ± 1,24	24,46 ± 0,32	26,31 ± 0,53	23,63 ± 4,67
	CP-CFL	22,49 ± 1,66	24,62 ± 2,38	24,61 ± 1,45	23,98 ± 2,04
	CP-SFL	21,21 ± 2,47	21,51 ± 1,85	22,49 ± 2,88	23,01 ± 1,04

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: <sup>NS</sup> = não significativo ( $p < 0,05$ ); \*CP-CFL = coproduto incluindo o componente Folha; CP-SFL = coproduto sem o componente Folha; Letras minúsculas seguidas da mesma letra na linha não diferem entre os clones e letras maiúsculas seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre os componentes ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Ainda na Tabela 14, para a holocelulose, ao analisar o fator clone dentro de cada componente observou-se que no fuste não houve diferença estatística. Em contrapartida, para CP-CFL e CP-SFL ocorreu efeito significativo entre os materiais genéticos, em que as maiores médias foram observadas para C-479 (60,91%) e C-455 (67,29%), respectivamente.

Entre os componentes foi possível observar um comportamento inverso ao encontrado para os extrativos totais, o fuste foi o que apresentou as maiores médias, devido principalmente, aos baixos teores de extrativos observado. Para CP-SFL e CP-CFL a diferença constatada está relacionada aos elevados teores de extrativos e cinzas proporcionado pela adição das folhas.

A holocelulose representa a quantidade de polissacarídeos estruturais, ou seja, corresponde ao somatório dos teores de celulose e hemicelulose presentes na biomassa. Quando se objetiva a produção de energia ou carvão vegetal são desejáveis matérias-primas com baixos teores da mesma, pelo motivo deste composto contribuir pouco no rendimento e muito na produção de gases condensáveis e não-condensáveis (SHEN et al., 2010; CARNEIRO et al., 2017).

Para indivíduos de *Eucalyptus urograndis* aos 5 anos de idade Soares et al. (2014) verificaram teor de holocelulose igual a 72,60%, enquanto que Silva et al. (2016) e Santos et al. (2016) observaram resultados variando de 62% a 65%, respectivamente para madeira de clones de *Eucalyptus*. Já para os coprodutos, Teixeira et al. (2016) obtiveram resultados entre 61% e 66%, corroborando com os dados obtidos neste trabalho.

Do ponto de vista de qualidade energética, o percentual de holocelulose de determinado combustível pode indicar o tempo de residência deste dentro do aparelho destinado a conversão energética, ou seja, como são formados por carboidratos de baixa resistência térmica, esta fração da biomassa tende a se degradar mais rapidamente durante o processo de combustão ou pirólise.

Isso implica inferir que altas porcentagens desse composto não são desejáveis quando se almeja utilizar a biomassa para a combustão ou produção de carvão vegetal. Outro aspecto ligado a holocelulose e aos extrativos é que ambos podem influenciar diretamente no teor de materiais voláteis liberados durante o processo de decomposição térmica do combustível.

A análise de variância revelou não haver significância entre os fatores analisados pelo teste F ( $p < 0,05$ ) para lignina total, entretanto, foi possível observar que os resultados variaram em média 2% entre os materiais genéticos e os componentes estudados (Tabela 15).

No componente fuste o clone C-479 foi o que apresentou a maior média (26,31%), justificando os  $525 \text{ kg m}^{-3}$  de densidade básica encontrado neste material. Este resultado poderá refletir na qualidade energética deste combustível, elevando a quantidade de carbono fixo e, conseqüentemente, no seu poder calorífico superior.

A lignina é um dos componentes mais importante quando a biomassa é destinada para produção de energia, sobretudo, na produção de carvão vegetal (CARNEIRO et al., 2017). Para Teixeira et al. (2016) a lignina é o grande contribuinte para o potencial energético apresentado por determinado biocombustível sólido durante a combustão, visto que está relacionado diretamente com o poder calorífico liberado e por proporcionar uma queima mais lenta devido a sua resistência térmica característica.

O tratamento com folha (CP-CFL) apresentou médias ligeiramente superiores ao CP-SFL, indicando que este componente também influencia no percentual de lignina total dos coprodutos florestais, suas médias variaram de 21,21% a 24,62%,

este resultado aliado aos baixos percentuais de holocelulose apontam que esses combustíveis tendem a se degradarem lentamente dentro do aparelho de conversão energética.

Em pesquisas realizadas por Trugilho et al. (2015) e Santos et al. (2016) com clones de *Eucalyptus* destinados à produção de carvão vegetal, encontraram teores de lignina total variando de 29% a 32%, resultados superiores aos observados neste trabalho. Já Teixeira et al. (2016) verificaram haver 20% de lignina em coprodutos de *Eucalyptus* de curta rotação para uso energético ficando abaixo dos valores encontrado para os coprodutos aqui relatados.

De maneira geral, o percentual de lignina encontrado para os materiais genéticos em análise apresentou níveis satisfatórios. No entanto, é importante a análise energética desses biocombustíveis para se atestar a qualidade deles para a produção de bioenergia.

#### 4.2.2 Análise energética da biomassa

A análise de variância das propriedades energéticas apontou haver interação significativa entre os fatores (clone x componente) a 5% de significância pelo teste F, isso indica que os fatores analisados são dependentes conforme pode ser observado na Tabela 15.

TABELA 15 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA AS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DOS CLONE DE *EUCALYPTUS*

Fonte de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio			
		Materiais voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono fixo (%)	Poder calorífico superior (kcal kg <sup>-1</sup> )
Clone	3	11,93*	3,579*	4,957*	27558*
Componente	2	475,79*	69,718*	181,772*	440434*
Clone x Componente	6	25,07*	0,893*	1,594*	32801*
Erro experimental	96	25,07	0,040	0,275	9164
Homogeneidade	-	0,08	0,33	0,15	0,91
R <sup>2</sup>	-	0,97	0,98	0,93	0,68
CV (%)	-	0,78	10,68	2,41	2,07

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: \*Significativo a 95% de probabilidade pelo teste F, R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, CV = coeficiente de variação (%).

Na Tabela 16, o resultado do teste de Tukey ao nível de 5% de significância, apontou que para o PCS as médias diferiram estatisticamente entre os clones apenas para o componente lenho, onde observou-se que os materiais genéticos analisados apresentaram resultados satisfatórios, com as maiores médias pertencendo ao C-479 e C-455, correspondendo a 4845 – 4852 kcal kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Contudo, o C-408 foi o que demonstrou o menor valor calórico (4668 kcal kg<sup>-1</sup>) sendo 3,8% inferior em relação a maior média o que corresponde a 184 kcal kg<sup>-1</sup> base seca.

TABELA 16 – RESULTADOS DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Variável	Componente	Clone			
		C – 408	C – 455	C – 479	C – 500
Poder Calorífico Superior (kcal kg <sup>-1</sup> )	Fuste	4668 ± 69 bA	4852 ± 98 aA	4845 ± 104 aA	4745 ± 42 abA
	CP-CFL*	4581 ± 69 aA	4569 ± 81 aB	4499 ± 139 aB	4449 ± 82 aB
	CP-SFL	4563 ± 42 aA	4587 ± 92 aB	4505 ± 76 aB	4490 ± 85 aB

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: \*CP-CFL = coproduto incluindo o componente Folha, CP-SFL = coproduto sem o componente Folha, Letras minúsculas seguidas da mesma letra na linha não diferem entre os clones e letras maiúsculas seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre os componentes ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Vale ressaltar que o PCS do fuste apresentou comportamento semelhante ao encontrado para a DB e ECM para C-479 e C-455, evidenciando a importância do elevado estoque em carbono na biomassa e a quantidade de energia liberada durante o processo de combustão. Esse resultado indica que essas propriedades são importantes na seleção de materiais lignocelulósicos para a produção de bioenergia.

Ao considerar essas propriedades na seleção de clones de *Eucalyptus* para a geração direta de energia ou produção de carvão vegetal, a DB apesar de grande potencial, apresentou maior CV (4,63%), indicando maior grau de heterogeneidade comparado com o ECM (0,22%) que é responsável por indicar quantitativamente o quanto de carbono por unidade de massa seca tem na madeira. Logo, a biomassa que apresentar maior resposta para esta variável, certamente, irá desprender mais energia durante a sua degradação térmica.

Os componentes CP-CFL e CP-SFL foram semelhantes estatisticamente entre si e entre os clones avaliados, ou seja, para esta propriedade a utilização dos coprodutos com o componente folha não demonstrou haver ganhos expressivos em energia calorífica liberada pelo processo de combustão, com decréscimo médio de 43 kcal kg<sup>-1</sup>.



Analisando apenas do ponto de vista da energia liberada por unidade de massa seca, todos os tratamentos analisados apresentam potencial para uso energético, inclusive os coprodutos. Esses apresentaram médias no intervalo de 4450 – 4648 kcal kg<sup>-1</sup>, sendo 4,4% (210 kcal kg<sup>-1</sup>) inferior ao valor médio (4778 kcal kg<sup>-1</sup>) encontrado para a madeira dos clones de *Eucalyptus* em estudo.

Para inferir sobre a qualidade e desempenho energético da biomassa lignocelulósica, é preciso conhecer o quanto de combustível é consumido no estado gasoso (materiais voláteis) e sólido (carbono fixo), além da quantidade de material residual após a combustão completa.

Nesse sentido, para a variável materiais voláteis o componente fuste apresentou as maiores médias, diferindo estatisticamente entre os clones, sendo que os valores observados para C-455 (80,71%), C-500 (80,79%) e C-408 (81,31%) podem ser justificados pelo elevado teor de holocelulose 72,11%, 72,36% e 73,39%, respectivamente. Entretanto, o clone C-455 se destacou com as maiores médias para CP-CFL (75,13%) e CP-SFL (76,20%) diferindo dos demais materiais analisados (Tabela 17).

Analisando o efeito dos componentes dentro de cada nível de clone, observa-se que os coprodutos não apresentam diferença estatística, exceto para C-455 em que o CP-SFL foi maior e estatisticamente diferente do CP-CFL, mas para os demais materiais genéticos o componente folha não exerceu influência.

Essa porcentagem de material que é consumida no estado gasoso auxilia no planejamento dos aparelhos destinados a conversão energética (fornos e caldeiras) e no dimensionamento do volume de ar teórico necessário para um bom fluxo dos gases, de modo que a reação de combustão ocorra em regime completo e homogêneo (GARCÍA et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2014).

Os resultados evidenciam que os componentes analisados apresentam boa qualidade para conversão direta em energia (combustão), uma vez que quanto maior o teor de material volátil, menor será a temperatura de ignição do combustível e por serem gases altamente energéticos, ao entrarem em contato com o oxigênio atmosférico tende a promover uma queima mais homogênea.

TABELA 17 – RESULTADOS DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA IMEDIATA DOS CLONES DE *EUCALYPTUS*

Variável	Componente	Clone			
		C – 408	C – 455	C – 479	C – 500
Materiais voláteis (%)	Fuste	81,31 ± 0,38 aA	80,71 ± 0,48 aA	79,55 ± 0,40 bA	80,79 ± 0,64 aA
	CP-CFL*	73,67 ± 0,62 bB	75,13 ± 0,61 aC	73,70 ± 0,60 bB	73,67 ± 0,49 bB
	CP-SFL	73,94 ± 0,88 bB	76,20 ± 0,77 aB	74,15 ± 0,47 bB	74,03 ± 0,65 bB
Cinzas (%)	Fuste	0,20 ± 0,02 aC	0,24 ± 0,06 aC	0,31 ± 0,04 aC	0,32 ± 0,07 aC
	CP-CFL	3,21 ± 0,17 aA	2,07 ± 0,30 cA	2,83 ± 0,23 bA	3,25 ± 0,23 aA
	CP-SFL	2,94 ± 0,34 aB	1,72 ± 0,26 cB	2,49 ± 0,13 bB	2,78 ± 0,20 aB
Carbono fixo (%)	Fuste	18,49 ± 0,37 bB	19,04 ± 0,43 bC	20,13 ± 0,42 aB	18,89 ± 0,65 bB
	CP-CFL	23,13 ± 0,58 aA	22,78 ± 0,47 aA	23,47 ± 0,62 aA	23,08 ± 0,43 aA
	CP-SFL	23,12 ± 0,60 aA	22,08 ± 0,61 bB	23,35 ± 0,40 aA	23,19 ± 0,59 aA

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: \*CP-CFL = coproduto incluindo o componente Folha, CP-SFL = coproduto sem o componente Folha, Letras minúsculas seguidas da mesma letra na linha não diferem entre os clones e letras maiúsculas seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre os componentes ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Para o teor de cinzas o resultado do teste de Tukey revelou não haver diferença para as médias encontradas no componente fuste, apresentando valores baixos variando de 0,20 – 0,32% para C-408 e C-500, respectivamente. Já o C-455 foi o que se destacou para CP-CFL (2,07%) e CP-SFL (1,79%) por proporcionar os menores percentuais de material inorgânico.

Ao comparar os componentes, verificou-se que a biomassa do fuste se destaca pelas menores médias, sendo a mais indicada para uso bioenergético. O tratamento CP-CFL apresentou as maiores médias para todos os clones e diferente estatisticamente do CP-SFL e fuste.

A diferença observada para o percentual de cinza entre os componentes está vinculada com a contribuição percentual dos componentes casca e folha na composição da biomassa dos coprodutos, uma vez que para o CP-CFL eles correspondem a 58,54% de toda a massa seca e o tratamento sem adição de folha (CP-SFL) apresenta em média 40,10% de casca.

Portanto, nesta variável foi possível observar que o componente folha contribuiu para o aumento no percentual de cinzas, justificando os baixos valores encontrados para o PCS discutidos anteriormente. O aumento nas CZ influenciados pela folha e casca estão relacionados com os elevados teores de micronutrientes estocados nesses componentes devidos as funções/atividades morfofisiológicas.

Simetti et al. (2018) ao avaliar separadamente a qualidade energética dos componentes de cinco espécies de *Eucalyptus*, observaram que a folha apresentou 4,04% a 4,83% e a casca 5,26% a 9,78% de cinzas, corroborando com a justificativa dos resultados encontrados neste trabalho.

O percentual de cinzas na biomassa indica a quantidade de materiais inorgânicos presentes no combustível, estes por sua vez não participam do processo de combustão interferindo diretamente e negativamente na quantidade de energia liberada durante a conversão energética. Portanto, a variável CZ apresenta um potencial para ser utilizada como indicadora de qualidade de determinado combustível para bioenergia e o desejável é que seus valores sejam os mais baixos possíveis.

A partir do estudo da composição química das cinzas de diferentes biomassas florestais para uso em geradores a vapor, Pelanda et al. (2015) constataram que o mix de resíduos florestais oriundos da colheita (galhos, folhas e casca) e a casca do Eucalipto revelaram uma forte tendência em formar incrustações dentro do equipamento devido a presença de elevados teores de  $\text{SiO}_2$  e de óxidos alcalinos  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ .

Deste modo, além de não contribuir com a energia liberada pelo combustível, os óxidos minerais, resíduos da combustão, são os principais agentes que causam a redução da eficiência energética dos equipamentos por dificultarem a troca térmica dentro dos aparelhos destinados a conversão energética, acarretando na necessidade de interrupção das atividades para sua manutenção.

Para o CF a análise estatística revelou que o C-479 apresentou a maior média (20,13%) para o componente fuste diferindo dos demais clones, este resultado corrobora com o obtido para o PCS, no qual este mesmo material despontou com um elevado valor energético.

Portanto, como se trata da fração do combustível que queima no estado sólido, quando em percentuais elevados tende a prolongar o tempo de residência do material e aumentar o seu valor calórico a ser liberado durante o processo de conversão energética dentro dos equipamentos de queima.

O tratamento CP-CFL não diferiu entre os materiais genéticos com valor médio na ordem de 23,11%, entretanto, o C-455 (22,08%) proporcionou a menor quantidade de CF para o componente CP-SFL, sendo diferente dos clones C-408 (23,12%), C-500 (23,19%) e C-479 (23,25%).

Analisando os componentes dentro de cada nível de clone, observou-se que o percentual de CF para os CP-CFL e CP-SFL foram maiores e estatisticamente diferentes do fuste, a resposta para este ocorrido pode estar relacionada ao fato desta propriedade apresentar relação inversamente proporcional aos teores de MV e CZ.

Do ponto de vista energético a quantidade de carbono fixo presente na biomassa contribui para um incremento no valor calórico a ser liberado no processo de conversão energética, uma vez que o carbono sólido está fortemente ligado a outros átomos de carbono por ligações C–C ou C=C, que apresentam maior entalpia de ligação química (ATKINS & JONES, 2012).

#### 4.2.3 Considerações do Tópico II

Para o componente fuste o clone C-479 destacou-se por apresentar maiores médias para estoque em carbono orgânico e poder calorífico superior, além de baixo teor de cinzas. Contudo, para CP-CFL e CP-SFL o C-455 foi o que revelou haver mais qualidade de uso bioenergético desses coprodutos devido a elevada quantidade de energia liberada e menor percentual de minerais inorgânicos.

O componente CP-CFL apresentou elevados teores de cinzas, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos analisados, revelando que a adição do componente folha influenciou no aumento da fração inorgânica do combustível, refletindo diretamente no valor calórico liberado.

Portanto, a adição do componente folha não contribuiu para ganhos positivos em energia que justifique a indicação do uso dos coprodutos florestais com folha para produção de bioenergia.

## 5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

O fuste é o componente que mais contribuiu na composição do estoque de massa seca total das árvores, e a casca a que apresentou a maior participação na biomassa total dos coprodutos dos clones de *Eucalyptus*.

O modelo matemático de Chave 1 foi o que obteve as melhores estatísticas de ajuste e precisão, sendo o mais indicado para estimar a massa seca total dos clones de *Eucalyptus* quando há disponibilidade de informação da variável densidade básica da madeira, caso contrário, recomenda-se o uso do modelo de Schumacher-Hall pois este necessita apenas das variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito (1,30 m do solo) e altura total.

Dentre os materiais genéticos analisados, indica-se os clones C-408, C-455 e C-479 para o cultivo de povoamentos destinados à produção de energia, por apresentarem alta produção de biomassa e de energia potencial por hectare, elevados valores de densidade básica, estoque em carbono orgânico, lignina total, poder calorífico superior e menor teor de cinza.

Por fim, não se recomenda a adição do componente folha na composição da biomassa para fins energéticos, uma vez que este promoveu um aumento no percentual de materiais inorgânicos, não contribuindo para ganhos positivos em qualidade e desempenho energético.

As considerações são:

- Para estudos futuros recomenda-se a realização de uma análise mais aprofundada da cinza produzida por esses materiais genéticos no intuito de se conhecer, principalmente, os índices de incrustação e escorias que os materiais inorgânicos, provenientes dessas biomassas, podem causar ao equipamento de conversão energética.
- Realizar os ensaios da química elementar e a quantificação da relação siringil-guaiacil (S/G) da lignina, bem como testar o potencial dos clones selecionados para a produção de carvão vegetal.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941 Madeira: determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro, 2003. v. 1.

ALMEIDA, L. S. DE; COUTINHO, C. H. O.; SANTANA, A. C. DE. Perspectivas para o reflorestamento no estado do Pará a partir do uso da terra no nordeste e sudeste paraense. **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 7, n. 13, p. 113–127, 2011.

ARAÚJO, A. C. C. DE; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BRAGA, P. P. DE C.; LIMA, R. V. DE; PROTÁSIO, T. DE P. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 405–414, 2016. DOI: dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n110.13

ASSIS, M. R. DE; PROTÁSIO, T. DE P.; ASSIS, C. O. DE; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291–302, 2012. DOI: dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.291

ASSIS, M. R. DE; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. DA S.; PROTÁSIO, T. DE P.; GOULART, S. L. Modelagem da biomassa e do estoque de carbono em plantas jovens de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 1–13, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **E711-87: standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter**. West Conshohocken, 2004.

ASTM INTERNATIONAL. **E872-82: standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels**. West Conshohocken, 2013a.

ASTM INTERNATIONAL. **D1102-84: standard test method for ash in wood**. West Conshohocken, 2013b.

ASTM INTERNATIONAL. **E870-82: standard test methods for analysis of wood fuels**. West Conshohocken, 2013c.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Floresta**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BRAND, M. A.; CUNHA, A. B. DA; CARVALHO, A. F. DE; BREHMER, D. R.; KUSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) Naudin (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 401–410, 2013.

BRASIL. **Balço energético nacional 2015: ano base 2014**. 9. ed. Rio de Janeiro: Empresa de pesquisa energética, 2015.

BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Jornal of Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755–1768, 2006.

BRUN, E. J.; BERSCH, A. P.; PEREIRA, F. A.; SILVA, D. A.; BARBA, Y. R. DE; DORINI JUNIOR, J. R. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. **Floresta**, v. 48, n. 1, p. 87–92, 2018.

**DOI:** [dx.doi.org/10.5380/rf.v48i1.51673](https://doi.org/10.5380/rf.v48i1.51673)

BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, F. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, v. 42, n. 1, p. 169–174, 2013.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.034](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.034)

CAI, J.; HE, Y.; YU, X.; BANKS, S. W.; ZHANG, X.; YU, Y.; LIU, R.; BRIDGWATER, A. V. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. 1, p. 309–322, 2017.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072)

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Avaliação de modelos de crescimento e produção. In: **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2006. p. 470.

CARNEIRO, A. DE C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C. DOS; FERREIRA, L. P.; DAMÁSIO, R. A. P.; VITAL, B. R.. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375–381, 2014.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019](https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019)

CARNEIRO, A. DE C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. DE F.; SILVA, C. M. S. DA. Caracterização energética das madeiras de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes localidades. **Revista Ciência da Madeira**, v. 8, n. 3, p. 127–135, 2017.

**DOI:** [dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135](https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p127-135)

CARVALHO, A. F.; BRAND, M. A.; NONES, D. L.; MARCO, F. T. DE; FRIEDERICH, G.; WEISE, S. M. K. Propriedades físicas e energéticas da madeira e do carvão vegetal da espécie *Hieronyma alchorneoides*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 257, 2014.

**DOI:** [dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.662](https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.662)



CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FOLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J. P.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, n. 1, p. 87–99, 2005.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x](https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x)

CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R.; OLIVEIRA, K. A. DE; BEHLING, A.; COUTINHO, V. M. Desempenho de diferentes equipamentos para mensuração de diâmetro a 1,30 m, altura individual total, e volume do fuste em *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 432–441, 2016.

**DOI:** [dx.doi.org/10.18677/Enciclopedia\\_Biosfera\\_2016\\_038](https://doi.org/10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2016_038)

CURTIS, R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365–375, 1967.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365](https://doi.org/10.1093/forestscience/13.4.365)

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and heating values of biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 2, p. 183–188, 2001.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00050-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00050-9)

DEMIRBAS, A. Relationships between lignin contents and fixed carbon contents of biomass samples. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 9, p. 1481–1486, 2003. **DOI:** [dx.doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00168-1](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00168-1)

DEMIRBAS, A. Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 6, p. 592–598, 2017.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798](https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798)

DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties**. 1. ed. Melbourne: CSIRO, 1997.

ELOY, E.; SILVA, D. A. DA; SCHMIDT, D.; TREVISAN, R.; CARON, B. O.; ELLI, E. F. Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill EX Maiden. **Revista Árvore**, v. 40, n. 4, p. 749–758, 2016. **DOI:**

[dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000400019](https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400019)

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: pacote experimental desingns (Portuguese)**. R package version 1.2.0, 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=ExpDes.pt>>

FONTOURA, M. R.; CARON, B. O.; ELOY, E.; TREVISAN, R.; TRAUTENMULLER, J. W.; BEHLING, A. Modelos alométricos para a estimativa de biomassa em área de regeneração natural de *Ateleia glazioviana* BAILL. **FLORESTA**, v. 47, n. 4, p. 469–478, 2017.

**DOI:** [dx.doi.org/10.5380/rf.v47i4.53988](https://doi.org/10.5380/rf.v47i4.53988)

FRIEDERICH, G.; BRAND, M. A.; CARVALHO, A. F. DE; KUSTER, L. C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.). **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 79–87, 2015.

**DOI:** [dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p79-87](https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p79-87)

FURTADO, T. S.; FERREIRA, J. C.; BRAND, M. A.; NEVES, M. D. Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 577–582, 2012.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1590/S0100-67622012000300020](https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000300020)

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresource Technology**, v. 139, n. March, p. 1–4, 2013.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.197](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.197)

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: **SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Ed.). Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971. p. 241–266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8, p. 36–38, 1986.

HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 15, p. 1965–1978, 2005.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1002/joc.1276](https://doi.org/10.1002/joc.1276)

HOMMA, A. Em Favor de uma Nova Agricultura na Amazônia. In: **Outras Expressões**. [s.l.: s.n.]. v. 1p. 19–34.

HOMMA, A. K. O. MADEIRA NA AMAZÔNIA: extração, manejo ou reflorestamento? **Amazônia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 7, n. 13, p. 147–162, 2011.

HSING, T. Y.; DE PAULA, N. F.; DE PAULA, R. C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273–283, 2016. **DOI:** [dx.doi.org/10.5902/1980509821119](https://doi.org/10.5902/1980509821119)

IBÁ. Relatório IBÁ 2017. In: PÖYRY CONSULTORIA EM GESTÃO E NEGÓCIOS LTDA. (Ed.). **Indústria Brasileira de Árvores**. 4. ed. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2017. p. 80.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FREITAS, F. P. DE; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **FLORESTA**, v. 47, n. 1, p. 11, 2017.

**DOI:** [dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418](https://doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418)

KAMM, B.; GRUBER, P. R.; KAMM, M. Biorefineries-Industrial Processes and Products. In: **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2016. p. 1–38.

**DOI:** [dx.doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418](https://doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418)

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*. **European Journal of Agronomy**, v. 6, n. 3–4, p. 163–177, 1997.  
**DOI:** [dx.doi.org/10.5380/rf.v47i1.48418](https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.48418)

LIU, W.-J.; JIANG, H.; YU, H.-Q. Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions. **Green Chem.**, v. 17, n. 11, p. 4888–4907, 2015. **DOI:** [dx.doi.org/10.1039/C5GC01054C](https://doi.org/10.1039/C5GC01054C)

MATOS, G. S. B. DE; SILVA, G. R. DA; GAMA, M. A. P.; VALE, R. S. DO; ROCHA, J. E. C. DA. Desenvolvimento inicial e estado nutricional de clones de eucalipto no nordeste do Pará. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 491–500, 2012.  
**DOI:** [dx.doi.org/10.1590/S0044-59672012000400006](https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000400006)

MATTOS, B. D.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; MELO, R. R. DE; SANTINI, E. J. Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 6, n. 1, p. 121–126, 2011.  
**DOI:** [dx.doi.org/10.5039/agraria.v6i1a1080](https://doi.org/10.5039/agraria.v6i1a1080)

MEDEIROS NETO, P. N. DE; OLIVEIRA, E. DE; PAES, J. B. Relações entre as características da madeira e do carvão vegetal de duas espécies da caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 484–493, 2014.  
**DOI:** [dx.doi.org/10.1590/2179-8087.051313](https://doi.org/10.1590/2179-8087.051313)

MELLO, N. G. R. DE; ARTAXO, P. Evolução do plano de ação para prevenção e controle do desmatamento na amazônia legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, n. 66, p. 108, 2017.  
**DOI:** [dx.doi.org/10.11606/issn.2316-901x.v0i66p108-129](https://doi.org/10.11606/issn.2316-901x.v0i66p108-129)

MELO, L. C. DE; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; HENTZ, A. M. K. Estimativa de biomassa e carbono total para árvores de caixeta no Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 77, p. 21–29, 2014.  
**DOI:** [dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.592](https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.77.592)

MENDOZA, M. S.; GÓMEZ, M. C.; NAVARRTE, L. R. O.; HERRERA, R. E. Chemistry characterization of *Eucalyptus nitens* from 8 years old coming from a commercial plantation. **Mexican Journal of Materials Science and Engineering**, v. 2, n. 3, p. 38–44, 2015.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. DE P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011. **DOI:** [dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319](https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.319)

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A. DA; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 112–121, 2015. **DOI:** [dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p112-121](https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p112-121)

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. DE C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592, 2013.

PRICE-ALLISON, A.; LEA-LANGTON, A. R.; MITCHELL, E. J. S.; JONES, J. M.; MASON, P. E.; WILLIAMS, A. Emissions performance of high moisture wood fuels burned in a residential stove. **Fuel**, v. 239, n. August 2018, p. 1038–1045, 2019. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.090](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.090)

PROTÁSIO, T. DE P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113–122, 2011. DOI: [dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113](https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.113)

PROTÁSIO, T. DE P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 317–326, 2012.

PROTÁSIO, T. DE P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A. DOS; TRUGILHO, P. F. Seleção de Clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 97, p. 15–28, 2013.

PROTÁSIO, T. DE P.; TRUGILHO, P. F.; CÉSAR, A. A. DA S.; NAPOLI, A.; MELO, I. C. N. A. DE; SILVA, M. G. DA. Babassu nut residues: potential for bioenergy use in the North and Northeast of Brazil. **SpringerPlus**, v. 3, n. 1, p. 124, 2014. DOI: [dx.doi.org/10.1186/2193-1801-3-124](https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-124)

PROTÁSIO, T. DE P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; LIMA JUNIOR, P. H. DE; SILVA, M. M. O. Avaliação tecnológica do carvão vegetal da madeira de clones jovens de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 801–816, 2015. DOI: [dx.doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6](https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.6)

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. DO; ANDRADE, A. P. A. DE; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. DOS S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100–106, 2005.

R CORE TEAM, R. **R: A language and environment for statistical computing**. Viena, Austria. R Foundation for Statistical Computing, 2018.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M. **Combustão e gaseificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; SCHUMACHER, M. V.; MELLO, A. A. DE. Relações individuais de biomassa e conteúdo de carbono em plantações de *Araucaria angustifolia* e *Pinus taeda* no sul do estado do Paraná, Brasil. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 1, n. 3, p. 33, 2003. DOI: [dx.doi.org/10.7213/cienciaanimal.v1i3.14937](https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v1i3.14937)

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013.

SANTOS, R. C. DOS; CARNEIRO, A. DE C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657–669, 2016.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. D. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SHAFIZADEH, F. Pyrolytic reactions and products of biomass. In: OVEREND, R. P.; MILNE, T. A.; MUDGE, L. K. (Eds.). **Fundamentals of thermochemical biomass conversion**. 1. ed. London: Springer Netherlands, 1985. p. 183–217.  
DOI: dx.doi.org/10.1007/978-94-009-4932-4

SHEN, J.; ZHU, S.; LIU, X.; ZHANG, H.; TAN, J. The prediction of elemental composition of biomass based on proximate analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 5, p. 983–987, 2010.  
DOI: dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.039

SILVA, C. M. S. DA; CARNEIRO, A. DE C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; ALVES, I. C. N.; MAGALHÃES, M. A. DE. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 6, p. 845–850, 2016.  
DOI: dx.doi.org/10.1007/s00107-016-1060-z

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A. DA; MAYER, S. L. S.; SOUZA, H. P.; MUNIZ, G. I. B. DE. Production of biomass and energy stock for five *Eucalyptus* species. **Revista Ciência da Madeira**, v. 9, n. 1, p. 30–36, 2018.  
DOI: dx.doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p30-36

SINDIFER. Anuário estatístico de 2017. In: **Sindicado da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais**. [s.l.: s.n.]. p. 25.

SIPAM, S. DE P. DA A. Zoneamento climático do Estado do Pará. **Centro Técnico e Operacional de Belém**, 2009.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HOLFER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543–549, 2014.  
DOI: dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HOLFER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **CERNE**, v. 21, n. 2, p. 191–197, 2015.  
DOI: dx.doi.org/10.1590/01047760201521021294

SPURR, S. H. **Forestry inventory**. New York: Ronald Press, 1952.

STOFFELS, A. The main problems in sample plots. **Ned Bosbouwtijdschr**, v. 25, n. 1, p. 190–199, 1953.



STRIUGAS, N.; VOROTINSKIENE, L.; PAULAUSKAS, R.; NAVAKAS, R.; DZIUGYS, A.; NARBUTAS, L. Estimating the fuel moisture content to control the reciprocating grate furnace firing wet woody biomass. **Energy Conversion and Management**, v. 149, p. 937–949, 2017.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.014)

STURGES, H. A. The choice of a class interval. **Journal of the American Statistical Association**, v. 21, n. 153, p. 65–66, 1926.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161](https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161)

TAPPI. **T204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp**, 2007. Disponível em: <http://www.tappi.org/content/sarg/t204.pdf>

TEIXEIRA, C. M.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F. M. Chemical characterization of *Eucalyptus* sp. residues from short rotation forests for bioenergy production. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1693–1701, 2016. **DOI:** [dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20160112](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160112)

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2634–2639, 2011.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.043)

TENÓRIO, R. S.; MEDEIROS, A. P. R.; SOARES, L. DA S.; COUTINHO, C. H. O.; PEREIRA, D. N. Diagnóstico dos projetos de reflorestamento no estado do Pará no período de 2008 a 2012. **Enciclopédia Bioesfera**, v. 11, n. 22, p. 3748–3755, 2015. **DOI:** [dx.doi.org/10.18677/Enciclopedia\\_Biosfera\\_2015\\_262](https://doi.org/10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2015_262)

TROREY, B. Y. L. G. A mathematical method for the construction of diameter height curves based on site. **Forest Chronicle**, v. 8, n. 2, p. 121–132, 1932.

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O. DE; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661–666, 2015.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130625](https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130625)

WENTZEL, M.; FLECKENSTEIN, M.; HOFMANN, T.; MILITZ, H. Relation of chemical and mechanical properties of *Eucalyptus nitens* wood thermally modified in open and closed systems. **Wood Material Science & Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2018. **DOI:** [dx.doi.org/10.1080/17480272.2018.1450783](https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1450783)

ZAKZESKI, J.; BRUIJNINCX, P. C. A.; JONGERIUS, A. L.; WECKHUYSEN, B. M. The Catalytic Valorization of Lignin for the Production of Renewable Chemicals. **Chemical Reviews**, v. 110, n. 6, p. 3552–3599, 2010.

**DOI:** [dx.doi.org/10.1021/cr900354u](https://doi.org/10.1021/cr900354u)

## APÊNDICE 1 – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS E LIGNINA

### Extrativos Totais

1. Pesar o equivalente a 1 g absolutamente seco (A.S) de serragem e transferir para saquinho de papel filtro;
2. Colocar a amostra do corpo de extrator;
3. Fazer a extração com etanol:tolueno (1:2) e etanol 99,5° GL, durante 8 horas em cada solvente, deixando secar ao ar após cada extração;
4. Ligar o banho-maria e mantê-lo em ebulição;
5. Transferir toda a serragem do saquinho para erlenmeyer de 125 mL;
6. Adicionar 100 mL de água destilada e colocar o erlenmeyer no banho-maria (que já deverá estar fervendo);
7. Agitar suavemente a cada 15 minutos;
8. Após três horas filtrar através de cadinho de vidro sinterizado (N° 2) tarado, transferindo toda a serragem do Erlenmeyer para o cadinho;
9. Lavar o cadinho com 250 mL de água quente destilada;
10. Levar o cadinho à estufa a  $103 \pm 5$  °C até massa constante;
11. Pesar o cadinho seco;
12. Calcular o teor de Extrativos totais através da fórmula:

$$EXT = \left( \frac{Pas - MLEx}{Pas} \right) \times 100$$

Em que: EXT = extrativos totais (%), Pas = massa da amostra absolutamente seca (g) obtida a partir do peso inicial da amostra, MLEx = massa da amostra livre de extrativos (g).

### Lignina

1. Pesar 300 mg da serragem livre de extrativos seca e transferir para o Erlenmeyer de 125 mL;
2. Adicionar 3 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 72% resfriado a 10 – 12 °C;
3. Manter em banho-maria a  $30 \pm 2$  °C durante 1 hora, misturando frequentemente com auxílio de bastão de vidro;
4. Retirar do banho-maria e adicionar 84 mL de água quente destilada, transformando o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 72% em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3%;
5. Levar novamente no banho-maria em ebulição e deixar por mais três horas;



6. Retirar do banho-maria e deixar descansar por 24 horas;
7. Filtrar através de cadinho de vidro sinterizado (Nº 2) tarado e transferir toda a lignina do Erlenmeyer para o cadinho;
8. Lavar com 700 mL de água quente destilada;
9. Levar o cadinho à estufa a  $103 \pm 5$  °C até massa constante;
10. Pesar o cadinho seco;
11. Calcular o teor de lignina insolúvel através da seguinte fórmula:

$$LI = \left[ \frac{\frac{MLEx}{0,3}}{1 - \frac{EXT}{100}} \right] \times 100$$

Em que: LI = teor de lignina insolúvel (%), MLEx = massa livre de extrativos (g), 0,3 = corresponde às 300 mg aferidas no início da análise, EXT = teor de extrativos totais.

12. Transferir o filtrado obtido nos itens 18 e 19 para o balão volumétrico de 1000 mL, completando o volume com água destilada;
13. Preparar prova em branco, diluindo 3 mL de ácido sulfúrico 72% para 1000 mL;
14. Utilizando cubeta de quartzo e a prova em branco, ajustar o espectrofotômetro em 0 de absorbância no comprimento de onda 215 nm e 280 nm;
15. Prosseguir com a leitura dos filtrados;
16. Calcular os teores de Lignina Solúvel e Lignina Total através da fórmula:

$$LS = \left[ \frac{4,53 \times L_{215} - L_{280}}{300 \times \left( \frac{0,3}{1 - \frac{EXT}{100}} \right)} \right] \times 100$$

$$LT = LI + LS$$

Em que: LS = teor de lignina solúvel (%) e LT = teor de lignina total (%).